

Tomas Vaarala

Taajuusmuuttajan piirit ja simulointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

23.04.2018

Tekijä Otsikko	Tomas Vaarala Taajuusmuuttajan piirit ja simulointi
Sivumäärä Aika	46 sivua + 8 liitettä 23.04.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinööritö kerton taajuusmuuttajan piireistä ja simuloinnista, kuinka eri piirit toimivat ja kuinka niiden toimintaa voidaan simuloida. Simuloinnin lopputuloksena luotiin kuvaajat virran aallosta ja pulssinleveysmodulaation jännitteistä Excelin avulla.</p> <p>Insinööritö keskeinen sisältö oli luoda yksi- ja kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan virran aaltomuodot Excel-simuloinnin avulla, hyödyntäen matemaattisia kaavoja sekä sähkökoneen teoriaa. Matemaattisessa laskennassa tärkeitä ovat Fourier-sarjat, integrointilausekkeet ja induktanssi-ilmiöt. Matemaattiset kaavat, jotka ovat resistanssin ja induktanssin arvot oikosulkumoottorista sekä virran arvot induktanssi-ilmiöstä.</p> <p>Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan kytkimet vaikuttavat erilaisiin sähkömoottorin induktanssi-ilmiöihin.</p> <p>Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen vaihtosuuntauspiirin virtoja ja jännitteitä on vertailtu simuloinnilla. Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen piirin pulssinleveysmodulaatio luodaan vaihtosuuntaajan kytkimillä sini- ja kolmioaallon vertailun avulla.</p> <p>Lopputulokset ovat simuloinnin osalta tasa- ja vaihtosuuntaajan teorioiden mukaiset. Lopussa pohditaan tasa- ja vaihtosuuntaajan valintaa. Simulointi auttaa tehoelektronikan piirien teorian ymmärtämisessä sekä sopivien ratkaisujen valinnassa.</p> <p>Simuloinnin tulokset ovat teorian mukaisia. Simuloinnissa havaittiin myös ongelmia vaihtosuuntaajan piirien toiminnassa. Lopussa tutkitaan tuloksia, joista selviää, mitkä vaihtosuuntaajan ongelmat ovat. Ongelmat ratkaistaan kehittämällä piirien ohjausta. Työn lopussa selvitetään saadut tulokset sekä esitetään simuloinnin tuloksena saadut jännitteen ja virran aaltomuodot sekä taulukkomuodossa että graafisesti.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, vaihtosuuntaaja, tasasuuntaaja, pulssinleveysmodulaatio

Author Title	Tomas Vaarala Frequency Converter Circuits and Simulation
Number of Pages Date	46 pages + 8 appendices 23 April 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and automation engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructor	Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The thesis describes the circuitry and simulation of the drive, how the operation works with circuitry and simulation. Simulation images were generated from current wave and pulse width modulation junctions with Excel.</p> <p>The content of the thesis was created with one-step and three-step inverted flow wave simulation, which was made with mathematical and theoretical help in Excel. Mathematical calculations are Fourier series, integration clauses, and inductance phenomena. Mathematical formulas used are the values of the resistance and inductance of the short circuit motor and the current values of the inductance phenomenon.</p> <p>Single-phase and three-phase switches affect different inductance phenomena.</p> <p>Comparison of single-phase and three-phase currents and voltages was done by simulation. Single-phase and three-phase pulse width modulation takes place in single-phase and three-phase inverter switches.</p> <p>The final results are based on the theory of the rectifier and the simulation / theory of inverters. The selections of the rectifier and the inverter is considered. Simulation can help in electronic solutions and theories. At the end the resulting waveforms of the simulation are presented in table and graphical form.</p>	
Keywords	frequency converter, inverter, rectifier, pulse width modulation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	6
2	Taajuusmuuttajan piirit	7
2.1	Yksivaiheisen tasasuuntaajan piirit	7
2.1.1	Diodisuuntaaja ja ohjattu diodisuuntaaja	8
2.1.2	Diodisiltasuuntaaja	10
2.2	Kolmivaiheinen diodiverkkosilta ja tyristoriverkkosilta	11
2.2.1	Diodiverkkosilta	11
2.2.2	Tyristorisiltakytkentä	13
2.2.3	Puoliohjattu diodisiltakytkentä	14
2.3	6-pulssisen diodisiltakytkennän toiminta	15
2.4	Jännitevälipiirin tasajännite ja kapasitanssi	18
2.4.1	Kolmivaiheisten ja yksivaiheisten vertailu	18
2.4.2	Kondensaattori	19
2.5	Vaihtosuuntaaja	19
2.6	Resistanssin ja induktanssin piiri	23
2.7	Oikosulkumoottorin resistanssi ja induktanssi	25
2.8	Oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden säätö	26
3	Simulointi	26
3.1	Säädettävä siniaalto ja kolmioaalto	27
3.2	Säädettävä pulssinleveysmodulaatio	30
3.3	Induktanssi-ilmiö vaihtosuuntaajassa	33
3.4	Virran pieneneminen ja nolladiodi	36
3.5	Pyörimisnopeuden säädön vaikutus vaihtosuuntaajan jännitteeseen	40
4	Tulokset ja pohdinta	42
4.1	Tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan piirit	42
4.2	Pulssinleveysmodulaatio elektroniikan piirit	43
5	Yhteenveto	44

Lähteet

46

Liitteet

Liite 1. Excelin kolmioaalto ja harmoniset

Liite 2. Excelin siniaallot ja kolmioaalto

Liite 3. Excelin yksivaiheinen ja kolmivaiheinen pulssinleveysmodulaatio

Liite 4. Induktanssin virrat ja jännitteet

Liite 5. Tehnyt koko Excelin kuvat

Liite 6. Sähkömoottori kuormitettavuus

Liite 7. Täysin ohjatut suuntaajakytkennät

Liite 8. ABB Motors and Generators

Lyhenteet

A	Ampeeri, virran yksikkö.
D_1 tai V_1	Diodi.
DTC	Direct Torque Control, suora vääntömomentin säätö.
E_L	Käämin indusoituvan lähdejännite.
f	Taajuus, tunnus on Hz, yksikkö on hertsi.
f_N	Nimellistaajuus.
GTO	Gate Turn-Off.
H	Henry on induktanssin SI-järjestelmän mukainen yksikkö.
i, i_{v1}, i_v	Vaihtovirran hetkellisarvo.
\hat{i}	Virran huippuarvo.
I_d, I_{DC}	Tasavirran tehollisarvo.
i_d, i_{dc}, i_r, i_L	Tasavirran hetkellisarvo.
IGCT	Integrated gate-commutated thyristor, integroitu portti-kommutoitu tyristori.
I_N	Nimellisvirta.
I_0	Maksimitasavirta.
L	Induktanssi.
L1, L2, L3	Kolmivaihe.
L1', L2', L3'	Kolmivaihe redusoitu.
M	Sähkömoottori.
n	Pyörimisnopeus.

n_N	Nimellispyörimisnopeus.
Q	Loisteho.
$Q_{1\alpha}$	Loisteho laskettu ohjauskulman kanssa.
P	Teho.
P_N	Nimellisteho.
PWM	Pulssinleveysmodulaatio.
RMS	Root Mean Square, Neliöllinen keskiarvo.
R, R_L	Resistanssi.
S	Näennäisteho.
T	Momentti, tunnus on Nm, yksikkö on Torque.
T	Aikajakso.
t	Hetkellisaika.
T_N	Nimellismomentti.
τ	Aikavakio.
U	Pääjännite.
u, u_v	Vaihtojännitteen hetkellisarvo.
\hat{u}	Jännitteen huippuarvo.
u_{dc}, u_r, u_L	Tasajännitteen hetkellisarvo.
U_{di0}	Ideaalinen tasajännite.
$U_{d\alpha}$	Tasajännitteen tehollisarvo laskettu ohjauskulman kanssa.
U_L	Induktanssin tehollisjännite.
U_L, U_v	Vaihejännite.

U_N	Nimellisjännite.
U_R	Resistanssin tehollisjännite.
U_{RMS}	Vaihtojännitteen tehollisarvo.
V_{AC}, U_{AC}	Vaihtojännitteen tehollisarvo, V = voltti, AC = alternating current = vaihtovirta.
V_{DC}, U_{DC}, U_{dc}	Tasajännitteen tehollisarvo, V = voltti, DC = direct current = tasavirta.
$W_{Ui}, w\%$	Tasajännitteen aaltoisuus.
ω	Kulmataajuus.
X_t, X_d, X	Reaktanssi.
Z	Impedanssi.
1~ ja 3~	Yksivaiheinen ja kolmivaiheinen.
α	Ohjauskulma.
π	Pii, matemaattinen vakio.
φ	Kulma.
Ω	Ohmi on resistanssi SI-järjestelmän mukainen yksikkö.

1 Johdanto

Taajuusmuuttajilla on merkittävä rooli sähköenergian säästämässä. Energiasäästö on puolestaan tärkeää koko maailmalle ympäristön ja kalliiden materiaalien säästämässä. Ympäristöystävällisen sähköenergian tuotanto vaatii riittävästi esimerkiksi tuuli- ja aurinkosähkövoimaloita. Öljyn ja hiilen käyttöä pyritään vähentämään, koska ne aiheuttavat kasvihuoneilmiötä maapallolla. Taajuusmuuttajat ovat tärkeitä laitteita energian säästämiseksi teollisuudessa, liikennevälineissä kuten sähköautoissa sekä asumisessa. Taajuusmuuttajien avulla voidaan tehostaa energiasäästöä, parantaa laatua sekä aikaansaada kestävämpää kehitystä.

Taajuusmuuttajia käytetään sähkövoima- ja sähkötekniikan puolella. Taajuusmuuttajassa on tehoelektronikan komponentit, jotka kehittyvät ja tekevät muut tekniikat mahdollisiksi. Insinööriyössä haluttiin ymmärtää syvällisesti, kuinka tehoelektronikan piirit luovat tasajännitteen tai vaihtojännitteen sekä moottorille syötettävän virran.

Työn teoriaosassa kuvataan taajuusmuuttajan piirien toimintaa. Työn käytännön osassa paneudutaan piirien simulointiin sekä siitä saataviin tuloksiin. Simuloinnilla saadaan havainnollistettua virran aaltomuotoa sekä pulssinleveysmodulaatiolla luotuja jännitteitä. Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan virtoja ja jännitteitä on vertailtu simuloinnilla.

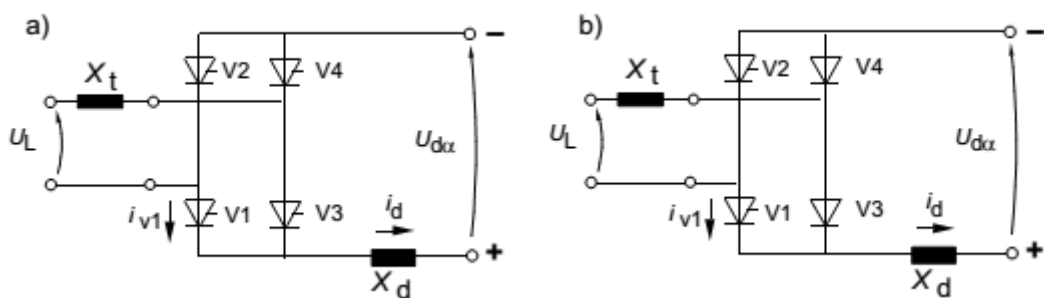
Simulointi luodaan Excelillä, jolla tehtiin laskennat matemaattisten kaavojen avulla. Matemaattiset kaavat, jotka ovat resistanssin ja induktanssin arvot oikosulkumoottorista sekä virran arvot induktanssi-ilmiöstä. Arvot toteutuvat luomaan simuloinnin Excelillä. Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan pulssinleveysmodulaatiot tapahtuvat yksivaiheisen ja kolmivaiheisen vertailut vaihtosuuntaajan kytkimistä. Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen vaihtosuuntaajat ovat erilaiset piirit ja pulssinleveysmodulaatiot, jotka vaikuttavat vertailuihin. Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen kytkimet vaikuttavat erilaisiin induktanssi-ilmiöihin.

Lopputulokset ovat simuloinnin osalta tasa- ja vaihtosuuntaajan teorioiden mukaiset. Lopuksi pohditaan tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan valintoja.

2 Taajuusmuuttajan piirit

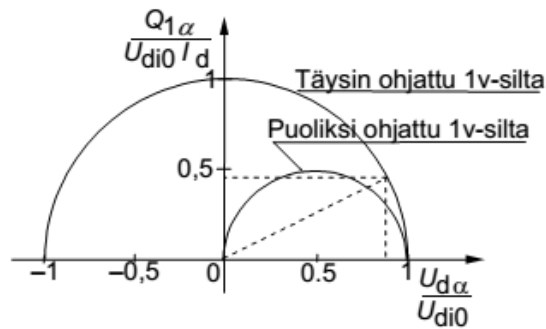
2.1 Yksivaiheisen tasasuuntaajan piirit

Yksivaiheiset diodisuuntaajat käyttävät yhden vaiheen jännitettä verkosta. Diodisuuntaajat sopivat pientehoisille (<viisisataa wattia) ja pienloistehoisille laitteille. Loisteho on induktanssin tai kapasitanssin kuormasta. Kuvassa 1 b) siltakytkennän puoliohjatut diodisuuntaajat sopivat pientehoisille ja pienloistehoisille moottori- ja magnetointikäyttöille. Kuvassa 1 a) on esitetty siltakytkennän täysin ohjatut diodisuuntaajat. Puoliohjatusta diodisuuntaajista käytetään pienloistehoja. Täysin ohjatusta diodisuuntaajista käytetään enemmän pienloistehoja kuin puoliohjatusta diodisuuntaajista. Esimerkki on kuvassa 2. [ABB:n TTT-käsikirja 2000: 11.]



Kuva 1 a) Siltakytkennän täysin ohjatut diodisuuntaajat. b) siltakytkennän puoliohjatut diodisuuntaajat. [ABB:n TTT-käsikirja 2000: 11.]

Kuvassa 2 vaaka on tasajännite ja pysty on loisteho. Kuinka paljon loistehoa täysin ohjattu ja puoliksi ohjattu 1-vaihesilta vaikuttavat tasajännitteeseen. Täysin ohjattu silta ohjaa pystymaan tasajännitteen negatiivisen ja positiivisen puolella ja maksimia loistehoa. Puoliksi ohjattu silta ohjaa vain puolia loistehoa ja tasajännitteen positiivisen puolilla. [ABB:n TTT-käsikirja 2000: 13.]

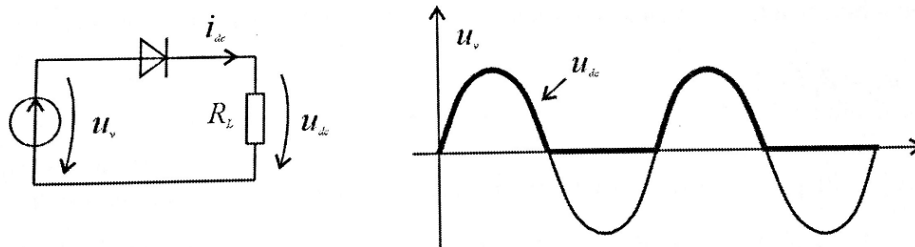


Kuva 2 Täysin ohjattu 1v-silta ja puoliksi ohjattu 1v-silta. [ABB:n TTT-käsikirja 2000: 13.]

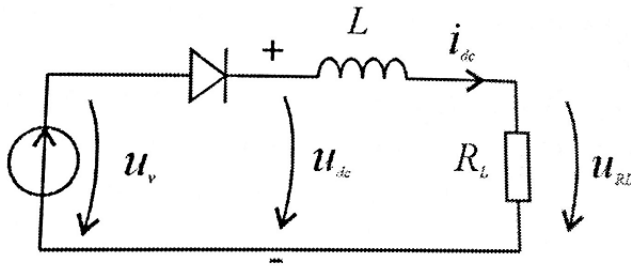
2.1.1 Diodisuuntaaja ja ohjattu diodisuuntaaja

Diodisuuntaaja johtaa vain positiiviset jaksot yhden vaiheen verkosta. Puoliaaltotasajännitteen eri kahdessa piirissä on induktanssi ja ilman induktanssi, jotka vaikuttavat aaltotasajännitteen eri kahteen muotoihin. Ilman induktanssin piiristä aaltotasajännite johtaa jännitettä positiivisella puolella. Induktanssin piiristä aaltotasajännite voi johtaa tasajännitettä positiivisella ja negatiivisella puolella riippuen induktanssista. Jos induktanssia kasvatetaan, aaltotasajännite kasvaa negatiivisella puolella. (Kuvat 3 ja 4.) [Hietalahti 2011: 35.]

Diodisuuntaaja:

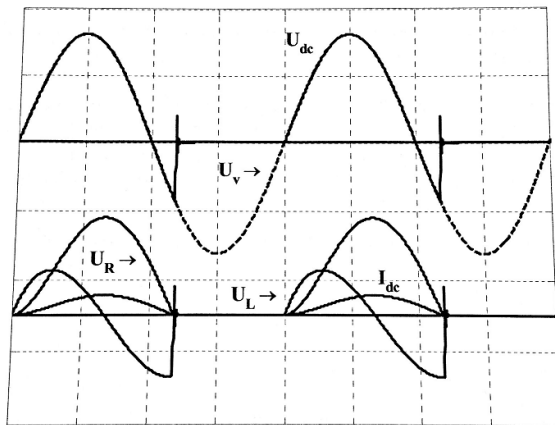


Kuva 3 Puoliaaltotasajännite. [Hietalahti 2011: 35.]



Kuva 4 Puoliaaltotasajännitteen piirissä on induktanssi. [Hietalahti 2011: 35.]

Kuvassa 5 induktanssin U_L jännitteestä varautuu energiaa positiivisella puolella ja purkautuu energiaa negatiivisella puolella. Induktanssin jännite positiivinen ja negatiivinen energia vaikuttavat aaltotasavirtaa I_{dc} aallolla. [Hietalahti 2011: 36.]



Kuva 5 Puoliaaltotasajännitteen induktanssin ja resistanssin jännitteet vaikuttavat aaltotasavirtaan. [Hietalahti 2011: 36.]

Puoliaaltotasajännitteen keskiarvo lasketaan integrointilausekkeella (ilman induktanssia) yhtälöllä 1:

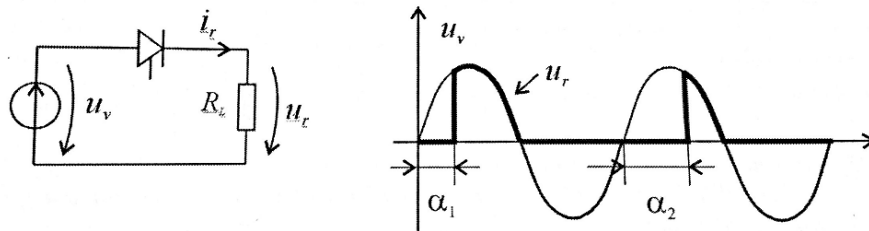
$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \sqrt{2} U_v \sin(\omega t) dt = \frac{1}{\omega T} \left| -\sqrt{2} U_v \cos(\omega t) \right|_0^{T/2} = \frac{1}{\pi} \sqrt{2} U_v = 0,45 U_v \quad (1)$$

U_v on vaihejännite (230 V), U on pääjännite (400 V).

Ohjattu diodisuuntaaja ei ole sama kuin diodisuuntaaja. Ohjatun diodisuuntaajan yleisimmät komponentit ovat tyristori, IGCT ja GTO. Jos ei ohjata ohjattua diodisuuntaajaa, estetään jännitettä alkujen johdettavilla positiivisilla jaksoilla. Ohjataan jännitettä aina

johdettavalla positiivisella jaksolla. Negatiivisia jaksoja ei johdeta, että ohjattu diodisuuntaaja sammuu ja estää johtamiseen. Ohjattu diodisuuntaaja voi ohjata jännitteen kasvamista nolasta aaltotasajännitteeseen asti (kuva 6.). [Hietalahti 2011: 45.]

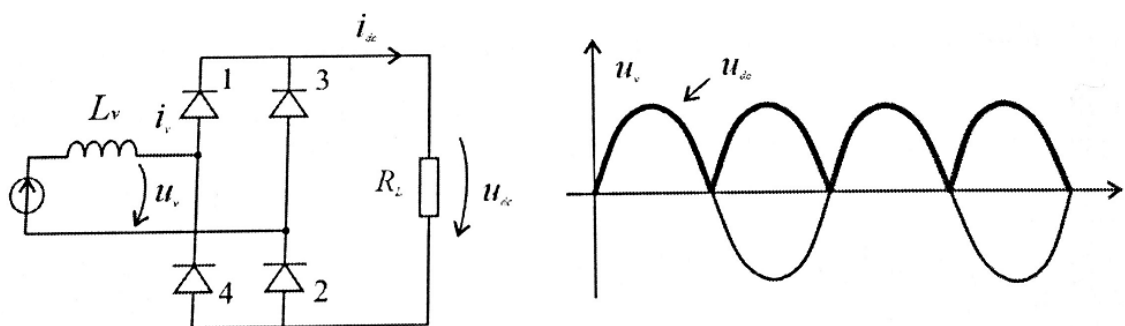
Ohjattu diodisuuntaaja:



Kuva 6 Thyristori ohjaa α , joka vaikuttaa aallon jännitemuoto. [Hietalahti 2011: 45.]

2.1.2 Diodisiltasuuntaaja

Diodisiltasuuntaaja saa kokoaaltoasajännitettä, koska piirissä on neljä ohjattua diodisuuntaajaa. Positiiviset ja negatiiviset jaksot johdetaan. 1. ja 2. diodit johtavat jännitettä positiivisilla jaksoilla. Jos muutetaan johtamaan aaltotasajännitettä negatiivisiksi jaksoiksi, 3. ja 4. diodit alkavat johtaa aaltotasajännitettä negatiivisilla jaksoilla. Diodisiltasuuntaaja on enemmän tasajännitettä kuin diodisuuntaaja. (kuva 7.) [Hietalahti 2011: 38.]



Kuva 7 Kokoaaltoasajännite. [Hietalahti 2011: 38.]

Kokoaaltoasajännitteen keskiarvo lasketaan integrointilausekkeella (ilman induktanssia) yhtälöllä 2:

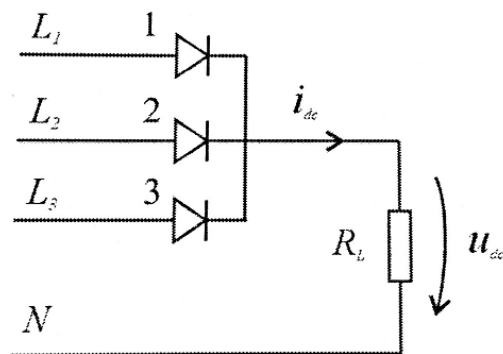
$$U_{dc} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sqrt{2} U_v \sin(\omega t) dt = \frac{1}{\omega T/2} \left| -\frac{1}{\omega} \sqrt{2} U_v \cos(\omega t) \right|_0^{T/2} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} U_v = 0,90 U_v \quad (2)$$

2.2 Kolmivaiheinen diodiverkkosilta ja tyristoriverkkosilta

Kolmivaiheinen diodiverkkosilta ja tyristoriverkkosilta hyödyntävät enemmän tehoa ja puhtaampaa aaltotasajännitettä. Häiriöt ja yliaallot vähenevät. Kolmivaiheinen diodiverkkosilta ja tyristoriverkkosilta vaativat kolmivaiheen vaihtojännitteitä verkosta. Kolmivaiheisen diodiverkkosillan ja tyristoriverkkosillan piirit ovat vielä enemmän aaltotasajännitteitä kuin diodisiltasuuntaaja ja diodisuuntaaja. [Hietalahti 2011: 45.]

2.2.1 Diodiverkkosilta

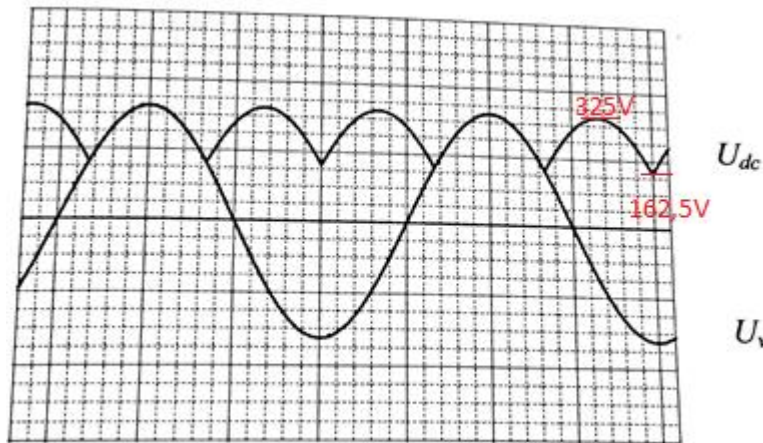
Kuvassa 8 syöttöverkolla on kolmivaiheinen vaihtojännite, josta tarvitaan nollajohdin, koska se on kolmen vaiheen jännitteen summa eli neutraalijännite. Piiri toteutuu näkyvänä aaltotasajännitteenä kuvassa 9. [Hietalahti 2011: 43.]



Kuva 8 Diodiverkkosilta. [Hietalahti 2011: 43.]

Kuvassa 9 on pulssit, jotka ovat max. $u = 325$ V ja min. $u = 162,5$ V. Lasketaan tasajännitteen keskiarvo yhtälöllä 3:

$$U_{dc} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \sqrt{2} U \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{3}{2\pi} \sqrt{2} U = 0,657 U \quad (3)$$

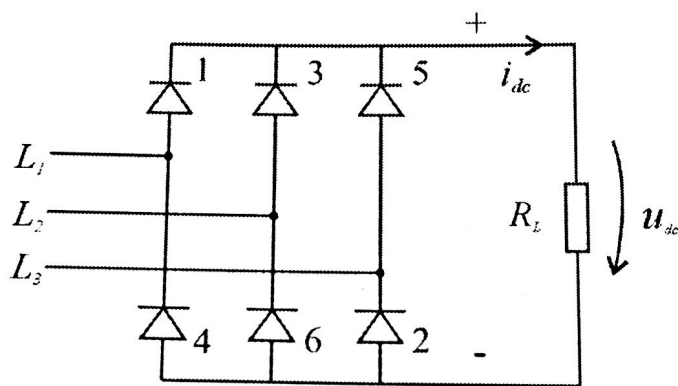


Kuva 9 Kolmivaiheisen siltakytkennän kautta U_v (1-vaiheinen jännite) tulovaihtojännitteeltä U_{dc} me-
noaaltotasajännitteelle yli min. 162,5V:stä min. 162,5V: iin asti ajan mukaan. [Hietalahti
2011: 43.]

Kuvassa 10 näkyy kolmivaiheinen diodisiltakytkentä, jossa piirillä on kuusi diodia. Se toteutuu aaltotasajännitettä tasajännitteen U_{dc} :n kuvassa 12. Diodisiltakytkentä ohjaa maksimiin tasajännitettä 540 V kiinteästi aaltotasajännitteellä. [Hietalahti 2011: 44.]

Lasketaan tasajännitteen keskiarvo yhtälöllä 4:

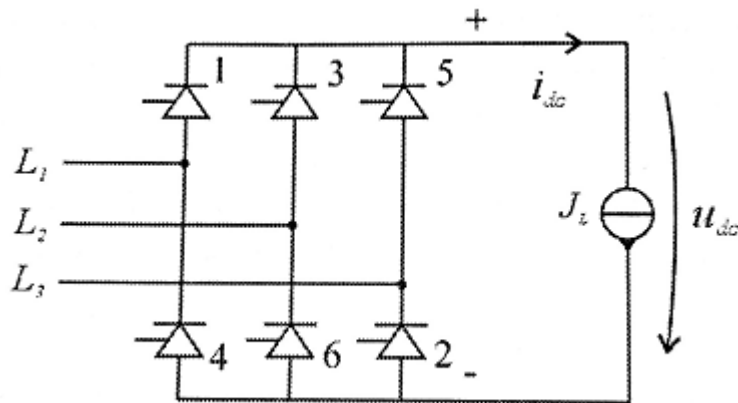
$$U_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} U \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U = 1,35 U \quad (4)$$



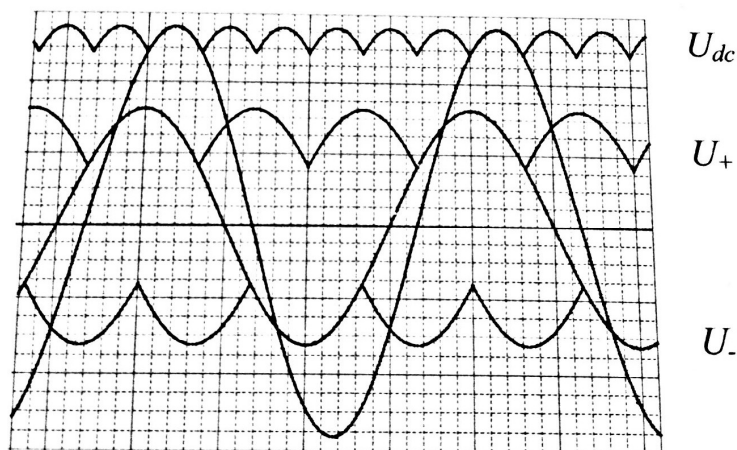
Kuva 10 Diodisiltakytkentä. [Hietalahti 2011: 44.]

2.2.2 Tyristorisiltakytkentä

Kuvan 11 tyristorisiltakytkentä näyttää vähän samalta kuin kuvan 10, mutta sillä on kuusi tyristoria pulssisiltakytkennässä ja maksimitasajännitettä 540 V, joka on sama kuin diodisiltakytkennän tasajännite, mutta tyristorit voivat ohjata positiivisia tai negatiivisia tasajännitteitä säätämällä, kuten +540 V...0...-540 V. Se toteutuu näkyvän U_{dc} tasajännitteen kuvasta 12. [Hietalahti 2011: 47–50.]



Kuva 11 Tyristorisiltakytkentä. [Hietalahti 2011: 48.]



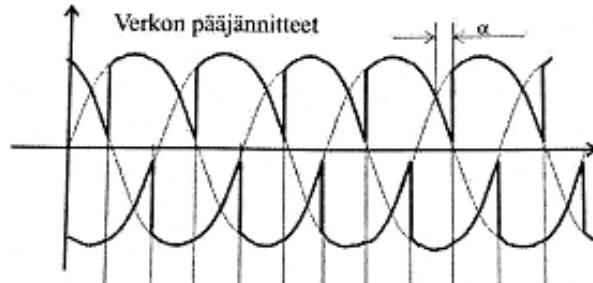
Kuva 12 Diodisiltakytkennän ja tyristorisiltakytkennän U_{dc} tasajännite, kolmivaiheen U_+ ja U_- vaihtojännitteet. [Hietalahti 2011: 44.]

Lasketaan tasajännitteen keskiarvo yhtälöllä 5:

$$U_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} U \cos(\omega t) d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U = 1,35 U \quad (5)$$

Jos ohjauskulma säädetään tyristorisiltakytkennällä, niin saadaan yhtälö 6:

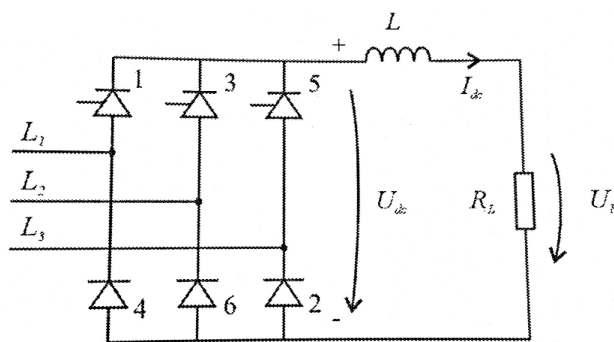
$$U_{dc} = 1,35U * \cos \alpha \quad (\text{kuvassa 2.13}) \quad (6)$$



Kuva 13 Tyristorisiltakytkennän ohjaukset vaikuttavat aaltotasajännitteen muutettavalla positiivisilla tai negatiivisilla. [Hietalahti 2011: 48.]

2.2.3 Puoliohjattu diodisiltakytkentä

Puoliohjattu diodisiltakytkentä toimii samalla tavalla kuin täysin ohjattu diodisiltakytkentä (kuusi tyristoria pulssisiltakytkentä), mutta puoliohjatulla diodisiltakytkennällä on kolme tyristoria ja kolme diodia piirissä (kuva 14). Se pystyy säätämään nolasta positiiviseen maksimiin tasajännitteen asti. Diodisiltakytkennässä on tasajännite kiinteästi, koska se ei pysty muuttamaan tasajännitettä. [Hietalahti 2011: 51–52.]

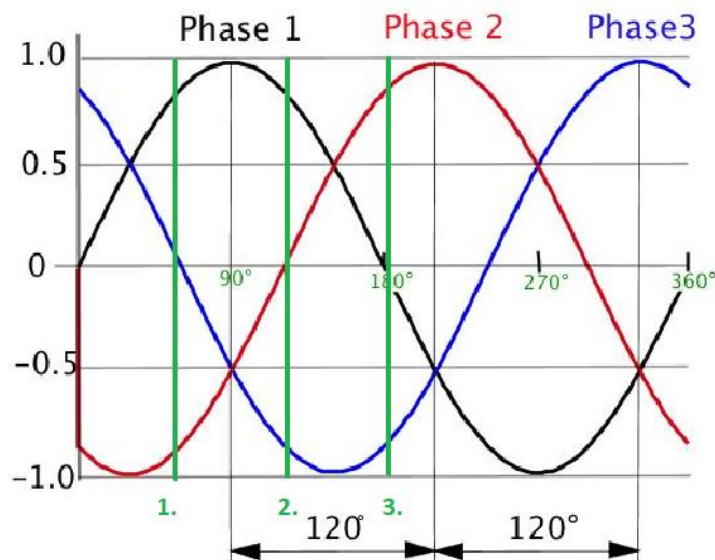


Kuva 14 Puoli ohjattu diodisiltakytkentä, jolla on kolme tyristoria ja kolme diodia piirissä. [Hietalahti 2011: 51.]

2.3 6-pulssisen diodisiltakytkennän toiminta

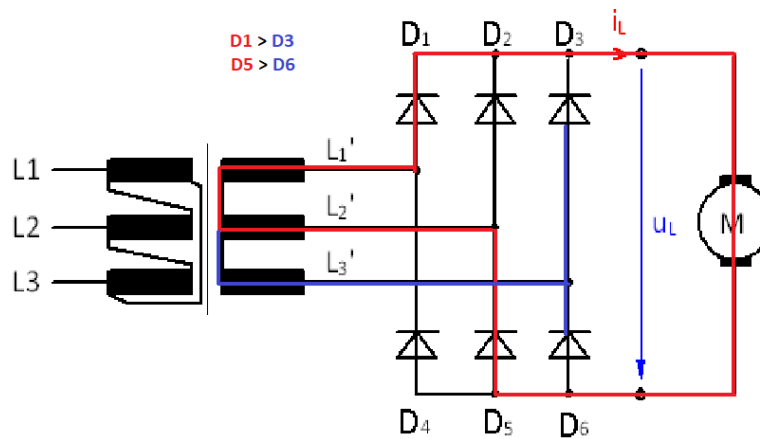
Seuraavaksi selvitetään virran kulkemista kuvien avulla. Diodit ohjaavat kulkemaan virtaa verkosta tasasuuntaajaan aaltotasajännitteeksi. Piirrettiin vihreät pystyviivat kolmivaiheisen aalloissa (kuvassa 15). Pystyviivat kertovat piirin tapahtumat seuraavista kuvista toimintana. Diodisiltakytkentä muuttuu vaihtojännitteistä aaltotasajännitteen. Aaltotasajännitteen laskeminen on kolmivaiheisen suhteet jännitteet tasasuuntaajoilla kuten kuvassa 19.

Kuvassa 15 on vihreät pystyviivat 1, 2 ja 3, jotka ovat kuvaajien seurassa (kuva 16, 17 ja 18) kuvan 15 alla, kuinka jännitteitä johdetaan piirissä positiivisella ja negatiivisella jaksolla, kuten kuvassa 15 on (1.) 3-vaiheen ennen ja jälkeen nollaa.



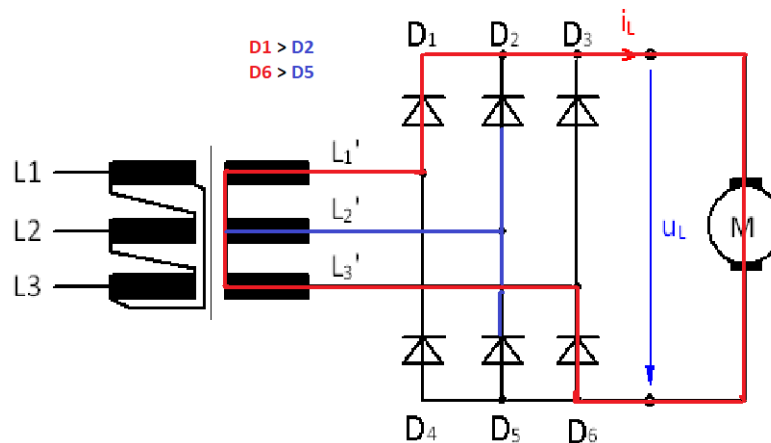
Kuva 15 Vihreät pystyviivat 1. = 60 astetta, 2. = 120 astetta ja 3. = 180 astetta. Phase = vaihe. [Electrical engineering 2018.]

Kuvassa 15 vihreän 1., 1-vaiheella kasvatetaan jännitettä kuin 3-vaiheella, kun 1-vaihe kumoa ja sammuu 3-vaihetta $D1 > D3$ eikä 3-vaihe tule jännitettä $D6$:stä, koska 3-vaiheella on positiivinen jännite. Myöhemmin 3-vaihe alkaa muuttua negatiiviseksi jännitteeksi, mutta jännite ei kulke vielä läpi diodille, koska 2-vaihe estää kulkevaa 3-vaihetta jännitteellä. Siksi 2-vaiheella on enemmän negatiivista jännitettä kuin 3-vaiheella. Kasvatetaan 3-vaiheen negatiivista jännitettä ja kumoa 2-vaihetta, sitten 3-vaihe kulkee diodin $D6$ läpi (kuvan 16).



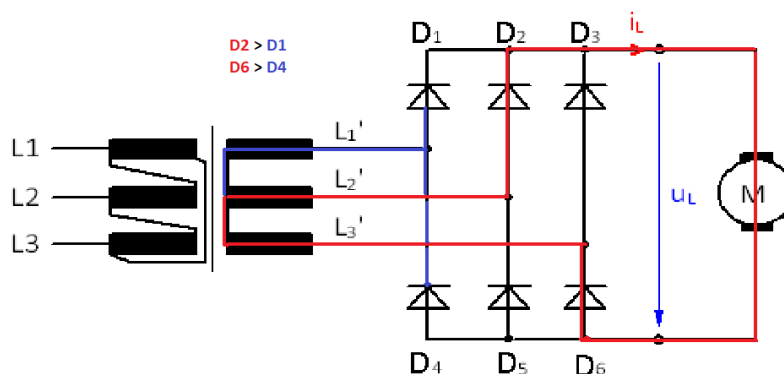
Kuva 16 1. vihreän pystyviivan 60 astetta. [Best of Elektronik 2010.]

Kuvassa 15 vihreän 2., 1-vaiheen D1 estää 2-vaiheen D2 jännitteellä eikä 2-vaihe tule jännitettä D5:stä, koska 2-vaiheella on negatiivinen jännite. Myöhemmin 2-vaihe alkaa muuttua positiiviseksi jännitteeksi, D1 estää D2, koska 1-vaiheella on enemmän jännitettä kuin 2-vaiheella (kuvan 17).



Kuva 17 2. vihreän pystyviivan 120 astetta. [Best of Elektronik 2010.]

Kuvassa 15 vihreän 3., kuvan 18 mukaan sama toiminta kuin kuvassa 16.



Kuva 18 3. vihreän pystyviivan 180 astetta. [Best of Elektronik 2010.]

Kuvassa 15 on asteet vaa'asta. Kuten valitaan 1-vaiheen 60 astetta, kun lasketaan jännitteen hetkellä.

$$u_1 = \hat{u} * \sin \alpha = 325V * \sin 60^\circ = 281V \quad (7)$$

Mutta 2-vaiheella on negatiivisen jännite ja 3-vaiheella on nolla, koska valittiin 1-vaiheen 60 astetta, tämä tarkoittaa, että 2-vaihe on 120 astetta ja 3-vaihe on 0 astetta.

Lasketaan:

$$u_2 = \hat{u} * \sin \alpha = -325V * \sin 120^\circ = -281V \quad (8)$$

$$u_3 = \hat{u} * \sin \alpha = \pm 325V * \sin 0^\circ = 0V \quad (9)$$

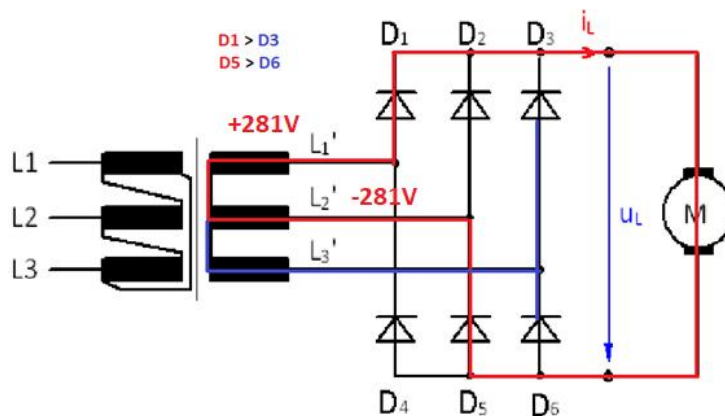
Kuvan 19 piiristä lasketaan kulkevan jännitteen summa yhtälöillä 10 ja 11:

$$U_{d, \max} = u_1 + u_2 + u_3 = 281V + |-281V| + 0V = 562V \quad (10)$$

$$U_{d, \min} = u_1 + u_2 + u_3 = 325V + |-162.5V| + 0V = 487.5V \quad (11)$$

Nämä arvot ovat aaltotasajännitteen aallot. Laskettu tasajännitteen keskiarvo on 540 V.

Virta kiertää suuntaa piirillä, kun jännitteet eivät vastusta. 2-vaiheen u_2 jännite negatiivinen muuttuu positiiviseksi yhtälön 10 mukaan (kuva 19).



Kuva 19

L1 ja L2 jännitteet yhdistävät. [Best of Elektronik 2010.]

2.4 Jännitevälipiirin tasajännite ja kapasitanssi

2.4.1 Kolmivaiheisten ja yksivaiheisten vertailu

Kolmivaiheista syöttöverkkoa tarvitaan taajuusmuuttajalla, josta saa enemmän tasajännitettä ja vähemmän tasajännitteen aaltoja kuin yksivaiheisesta taulukon 1 mukaan. Lisätietoja suuntaajatyypin jännitteestä aaltoisuudesta vaihtoehtoista on liitteessä 7. [Hietalahti 2011: 45.]

Taulukko 1 Suuntaajatyypin synnyttämä jännitteen aaltoisuus. [Hietalahti 2011: 45.]

Tasasuuntaajatyyppe	U_2/U_1	w %
1-vaih.puoliaalto	0.45	121
1-vaih. siltakytke	0.90	48.4
3-vaih. siltakytke	1.35	4.12

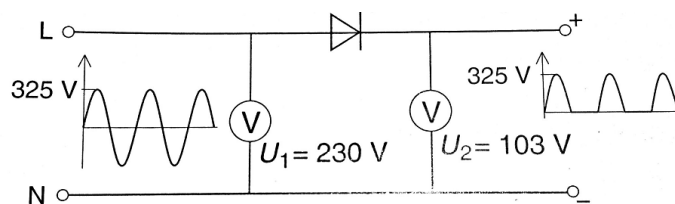
w% tai W_{ui} % on tasajännitteen aaltoisuus, joka tarkoittaa U_{ac} suhdetta jakson aikana 20 ms tasajännitteen keskiarvon mukaan yhtälöllä 13. U_{ac} laskee tasajännitteen tehollisarvon U_{rms} ja tasajännitteen keskiarvon U_{dc} kautta yhtälöllä 12.

$$U_{rms} = \sqrt{U_{dc}^2 + U_{ac}^2} \rightarrow U_{ac} = \sqrt{U_{rms}^2 - U_{dc}^2} \quad (12)$$

$$w\% = \frac{U_{ac}}{U_{dc}} = \sqrt{\frac{U_{rms}^2}{U_{dc}^2} - 1} \quad (13)$$

Halutaan laskea, kuinka lasketaan w% suhde yhtälöllä 12 ja 13. Selvittiin esimerkit 1 ja 2 yhtälöllä 14–15 ja 16–17, jotka ovat yksivaiheisissa diodisuuntaajissa, jotka ovat puoliaaltotasasuuntaus ja kokoaaltotasasuuntaus aaltotasajännitteet:

Esimerkki 1.

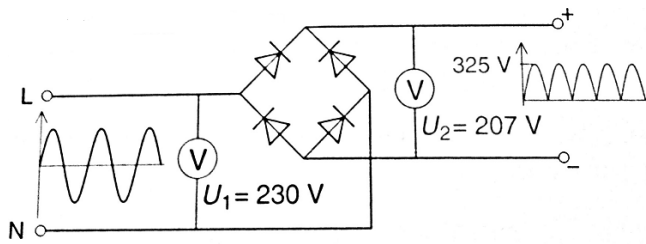


Kuva 20 Puoliaaltotasasuuntaus. [Ahoranta 2008: 157.]

$$U_{rms} = \frac{\hat{u}}{2} = \frac{325V}{2} = 162,5V \quad U_{dc} = \frac{\hat{u}}{\pi} = \frac{325V}{\pi} = 103,5V \quad (14)$$

$$w\% = \frac{U_{ac}}{U_{dc}} = \sqrt{\frac{U_{rms}^2}{U_{dc}^2} - 1} = \sqrt{\frac{162,5^2}{103,5^2} - 1} = 1,21 \rightarrow 121\% \quad (15)$$

Esimerkki 2.



Kuva 21 Kokoaltotasasuuntaus. [Ahoranta 2008: 156.]

$$U_{rms} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 229,81V \quad U_{dc} = \frac{2*\hat{u}}{\pi} = 206,9V \quad (16)$$

$$w\% = \frac{U_{ac}}{U_{dc}} = \sqrt{\frac{U_{rms}^2}{U_{dc}^2} - 1} = \sqrt{\frac{229,81^2}{206,9^2} - 1} = 0,48 \rightarrow 48\% \quad (17)$$

2.4.2 Kondensaattori

Kondensaattorilla on kapasitanssi, joka tasoittaa aaltotasajännitettä maksimiksi tasajännitteeksi. Yleensä laitetaan kapasitanssia jännitevälipiirille, koska vaihtosuuntaajat tarvitsevat tasajännitettä tasoittamaan virtaa. Jos ei tasoiteta aaltotasajännitettä, aiheutetaan virran epääallot syöttömoottorille ja vaihtosuuntaajien epätasajännitteet. [Hietalahti 2011: 37–38.]

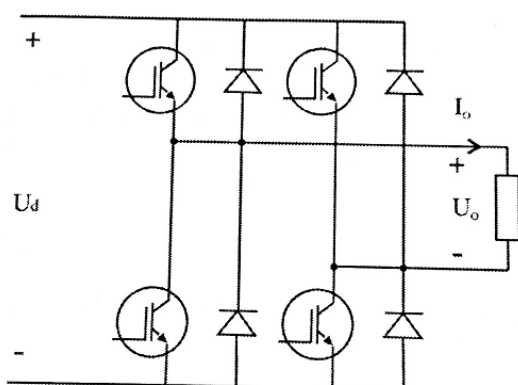
2.5 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja tarkoittaa, että tasajännite muutetaan vaihtojännitteeksi. Siksi yleisimmät käyttölaitteet ja oikosulkumoottorit vaativat käyttämään vaihtojännitettä verkosta. Jos sähköverkko katkeaa, tasajännite akusta tarvitaan varasähkölähteestä esimerkiksi

sairaalaan ja teollisuuteen. Sähköenergiaa varataan akkuun, josta sitä syötetään verkkoon vaihtojännitteeksi. [Hietalahti 2011: 87–88.]

Vaihtosuuntaaja voi ohjata jännitettä riippuen rakennepiiristä yksivaiheisella tai kolmivaiheisella. Yksi- ja kolmivaiheinen ovat eri piirin rakenteet. Yhden vaiheen piirissä on neljä katkojaa. Kolmivaiheella on kuusi katkojaa. PWM eli pulssinleveysmodulaatio ohjaa vaihtosuuntaajan katkojia, jotka ohjaavat induktanssin virtaa jännitteellä (kuva 28). Yksivaiheisessa ja kolmivaiheisessa on erilaiset pulssinleveysmodulaation tyyliä. [Hietalahti 2011: 88–90.]

Vaihtosuuntaajan neljä katkojaa ohjaavat yksivaiheen virran jännitettä. Kuormituksessa on resistanssi ja induktanssi, jotka luovat virran käyrää (kuva 28). Jännitettä ohjataan positiiviseen ja negatiiviseen suuntaan. Ohjataan neljä katkojaa yhden signaalin pulssinleveysmodulaatiolla. [Hietalahti 2011: 82.]

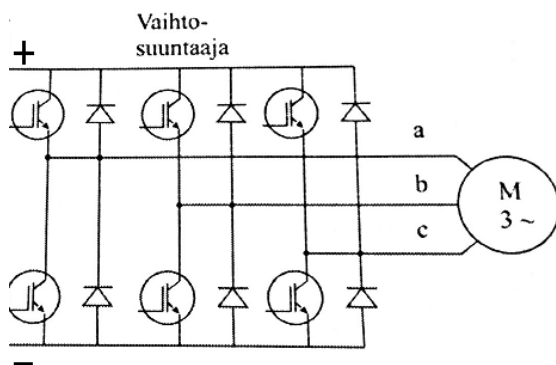


Kuva 22 Neljä katkojaa ja kuormitus. Diodit suojaavat katkojia. [Hietalahti 2011: 82.]

Kolmivaiheisella on kolme signaalia pulssinleveysmodulaatioilta, koska kolmivaiheisella on vaihtosuuntaajan kuusi katkojaa. Kolme signaalia ovat omat siniaallot, jotka ovat omat eroa 120 astetta aikajaksolla (kuvan 24). [Hietalahti 2011: 88.]

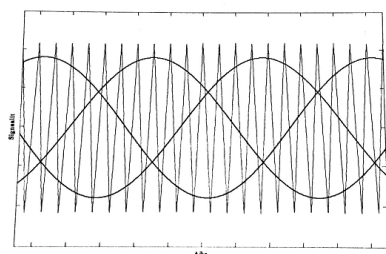
Lisäksi kolmivaiheisen vaihtosuuntaajalla on menojännitteet L1, L2 ja L3. L1 ja L2 yhdistävät jännitteen tehollisarvot 400 V:n pääjännitteeksi, joka vaikuttaa pulssinleveysmodulaation muotoon (kuvan 25 "Ph to Ph"). [Pantechsolutions 2017.]

Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajassa on kuusi katkojaa ja kuusi diodia. Kuusi diodia suojaavat katkojia virtapiikieltä tai kulkevat virtaa vaihtosuuntaajan välikatkaisella nolladiodin kautta (kuvan 50).



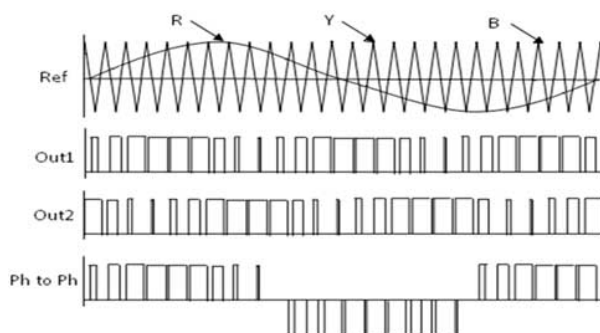
Kuva 23 Kuusi diodia, kuusi katkojaa ja oikosulkumoottori. $a=L1$, $b=-L2$ ja $c=L3$. [Hietalahti 2011: 91.]

Kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaatiolla on kolme eri sinisignaalia ja yksi kolmiosignaali.



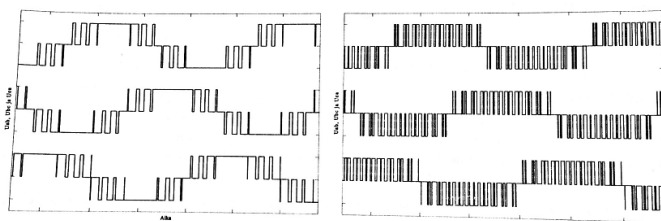
Kuva 24 Kolme eri sini-signaalia ja yksi kolmio-signaali. [Hietalahti 2011: 88.]

Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajalla on menojännitteet, jotka vaikuttavat jännitteiden suhteisiin pääjännitteeksi. Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan pulssinleveysmodulaatiot.



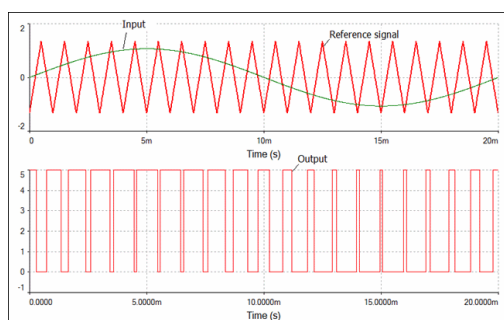
Kuva 25 Ref on sama kuin kuvassa 2.27. Out 1 on L1 vaiheen PWM. Out 2 on L2 vaiheen PWM. "Ph to Ph" tarkoittaa, että L1:n ja L2:n jännitteet yhdistyvät pulssinleveysmodulaatiot. [Pantech-solutions 2017.]

Kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaation leveiden säätämisen vaikutus pääjännitteeseen. Kolmivaiheen pulssinleveysmodulaatioin jaksot ohjataan kytkimillä positiivisen ja negatiivisen puolella.



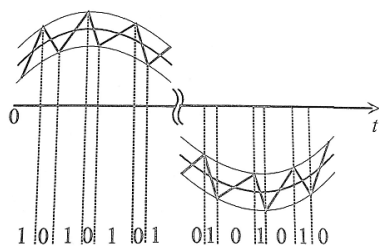
Kuva 26 Säädetään pulssinleveysmodulaatioin leveät sini-signaalilla ja kolmio-signaalilla. [Hietalahti 2011: 89.]

Yksivaiheisen vaihtosuuntaajan pulssinleveysmodulaation jakso ohjataan päällä kytkimillä positiivisen jännitteen puolella, päältä kytkimiltä negatiivisen jännitteen puolella kuvan 44 ja 45 mukaan.



Kuva 27 Yksivaiheisen pulssinleveysmodulaatio. [Multisim 2018.]

Yksivaiheisen ja kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaatio ohjaa induktanssi-ilmiön virtaa kytkimien rajalla.

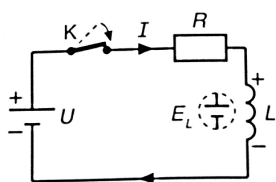


Kuva 28 Signaalit vaikuttavat virran aaltomuotoon induktanssi-ilmiöllä [Viitanen 2005: 43.]

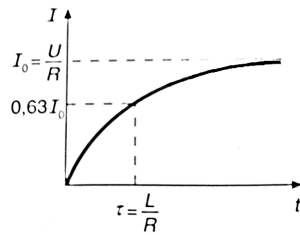
2.6 Resistanssin ja induktanssin piiri

Taajuusmuuttajaa käsitellessä on ymmärrettävä fysiikan teoriaa, koska tasajännite vaihtaa oikosulkumoottoriin, jossa on induktanssia ja resistanssia. Pulssinleveysmodulaatio ohjaa vaihtosuuntaajan kytkimet. Aloitetaan ja suljetaan kytkin päällä, kun virta kulkee sähkömoottoriin tasajännitteen kautta ja induktanssi kasvattaa virtaa. Avataan kytkin päältä, kun induktanssi laskee virtaa ja kulkee virtaa nolladiodin kautta. Ilman nolladiodia, ei lasketa virtaa, vaan pysäytetään virta nollaan. [Aura ym. 2009: 182–184.]

Kun tiedetään resistanssin ja induktanssin arvot voidaan laskea RL-piirin aikavakio. Aikavakio vaikuttaa virtaa kasvatettaessa ja laskettaessa. [Aura ym. 2009: 182–184.]



Kuva 29 Kytkin suljetaan päällä, kun virtaa aloitetaan kasvussa. [Aura ym. 2009: 183.]



Kuva 30 Induktanssin ilmiön virran käyrä, että suljetaan kytkin virralla. [Aura ym. 2009: 183].

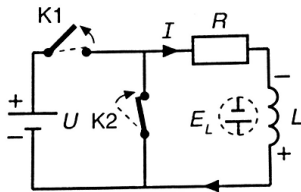
Lasketaan aikavakio kaavan 18 mukaan.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (18)$$

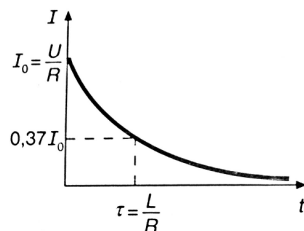
Virran I :n 19 hetkellä kasvavan kaavassa, I_0 19 tarkoittaa induktanssissa, että virta on täysin.

$$I = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (19)$$

Virtaa laskettaessa, että lasku on vähän erilainen tapa yhtälö 20 kuin kasvun virran yhtälö 19. Lisäksi piirissä on nolladiodi kuvan 31 mukaan.



Kuva 31 Avataan kytkin K1, kun virtaa lasketaan nolladiodin kautta. K2 olisi nolladiodi. [Aura ym. 2009: 184.]



Kuva 32 Induktanssin ilmiö virran käyrä, kytkin avataan virran nolladiodilla. [Aura ym. 2009: 184.]

Virran pieneneminen lasketaan yhtälöllä 20:

$$I = \frac{U}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = I e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (20)$$

2.7 Oikosulkumoottorin resistanssi ja induktanssi

Tarvitaan sähkömoottorin kilpiarvon tiedot, että voidaan laskea resistanssin ja induktanssin arvot. Näin halutaan tutkia virran aaltoa vaihtosuuntaajasta Excelin avulla. Laskun kaavat selvittää teorian avulla.

Sähkömoottorin kilpiarvossa on nimellisjännite, -virta ja tehokerroin. Kun saadaan tiedot, lasketaan niiden mukaisesti. [Hietalahti 2011: 26–30.]

Näennäisteho lasketaan yhtälöllä 21:

$$S_n = \sqrt{3} U_n I_n = 3 Z I_n^2 \rightarrow Z = \frac{S_n}{3 I_n^2} \quad (21)$$

Tehokerroin saadaan yhtälöstä 22:

$$\cos\varphi \rightarrow \sin\varphi \quad (22)$$

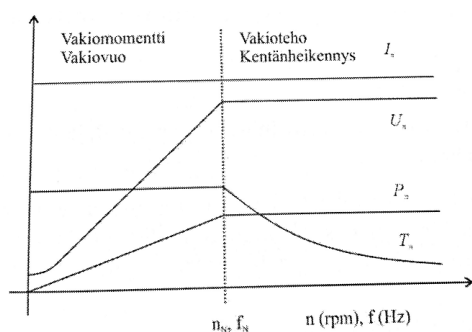
Resistanssi ja induktanssi impedanssista lasketaan yhtälöllä 23 ja 24:

$$R = Z \cos\varphi \quad (23)$$

$$X = Z \sin\varphi = 2\pi f L \rightarrow L = \frac{Z \sin\varphi}{2\pi f} \quad (24)$$

2.8 Oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden säätö

Muutokset nopeus, jännite ja taajuus säätämisestä. Oikosulkumoottorilla on nimellisyörimisnopeus, joka säädetään alle tai yli nopeuden muutoksilla. Nimellisyörimisnopeuden alle ja yli vaikuttavat vakiovuo ja kentänheikennys magneettivuohon. Vakiovuo kuuluu nimellisyörimisnopeuden alle ja vakiomomentin alueelle, jotka pysyvät magneettivuota vaa'alla. Nimellisjännite ja -teho aloittavat olla laskemassa nimellisyörimisnopeuden alle. Nimellisyörimisnopeuden yli on vakio nimellisjännite ja -teho vaa'alla kentänheikennykselle. Nimellisvirta on koko nimellisyörimisnopeuden nollasta kaksi kertaa enemmän nimellisyörimisnopeudelle asti vakiona. Kaksi kertaa enemmän nimellisnopeudetta, joka on oikosulkumoottorin mekaniikan rajaan asti. Oikosulkumoottorin mekaniikka ei kestä, jos mekaniikan rajan yli. [Hietalahti 2012: 25–30; Hietalahti 2011: 53–54.]



Kuva 32

Oikosulkumoottorin nimellisjännite, -virta, -teho, -momentti ja -nopeus käyränä. [Hietalahti 2013: 53.]

3 Simulointi

Simulointia varten valittiin oikosulkumoottori ABB:n luettelotuotteista. Valitun oikosulkumoottorin kilpiarvot laskettiin resistanssin ja induktanssin arvoihin. Resistanssin ja induktanssin arvot saadaan, kun luodaan ja rakennetaan simulointi logiikalla ja matemaattisesti. Lisätään Fourier-sarjojen matemaattiset yhtälöt simulointiin pulssinleveysmodulaation ohjauksen tarvittaessa. Tutkitaan simulointikuvat ja analogiakuvat vertailemalla. Oskilloskoopin analogiakuvat on otettu laboratoriosta.

3.1 Säädetty siniaalto ja kolmioaalto

Simulaatioon rakennettiin kolmioaalto Excelin avulla Fourier-sarjan kautta. Näin löydettiin kolmioaalto harmonisien aallokkaava. Ratkaistaan kolmioaalto kuvaan Excelin avulla. Kolmioaaltoja pitää luoda monta harmonista, koska monet harmoniset summaavat muuttumaan kolmioaalloksi.

a_n on kertoimen ja harmonisen aallon huippu yhtälö 26. A_{kolmio} on amplitudi, että halutaan kolmioaallon huipun arvo. n on pariton luku yhtälö 25. [Swarthmore 2015]

$$n=1,3,5,7,9,\dots \quad (25)$$

$$a_n = \frac{8A \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right)^2}{\pi^2 n^2} \quad (26)$$

f on vakiotaajuus, mutta suunnittelun mukaan se on säätötaajuus. Siksi tarvitaan ohjaamaan leveyden kolmioaaltoa, kun leveyden kolmioaalto vaikuttaa muuttumaan aallon pinnalle induktanssin virtaan esimerkki kuvan 28 mukaan. Yhtälö 27 f_n on harmonisen aallon taajuus. Harmonisen aallon taajuus luodaan harmonisen aallon siniaalto yhtälön 28 mukaan.

$$f_n = n * f \quad (27)$$

$$1. \text{ harmoninen aalto } = f(t) = a_n * \sin(2\pi f_n t) \quad (28)$$

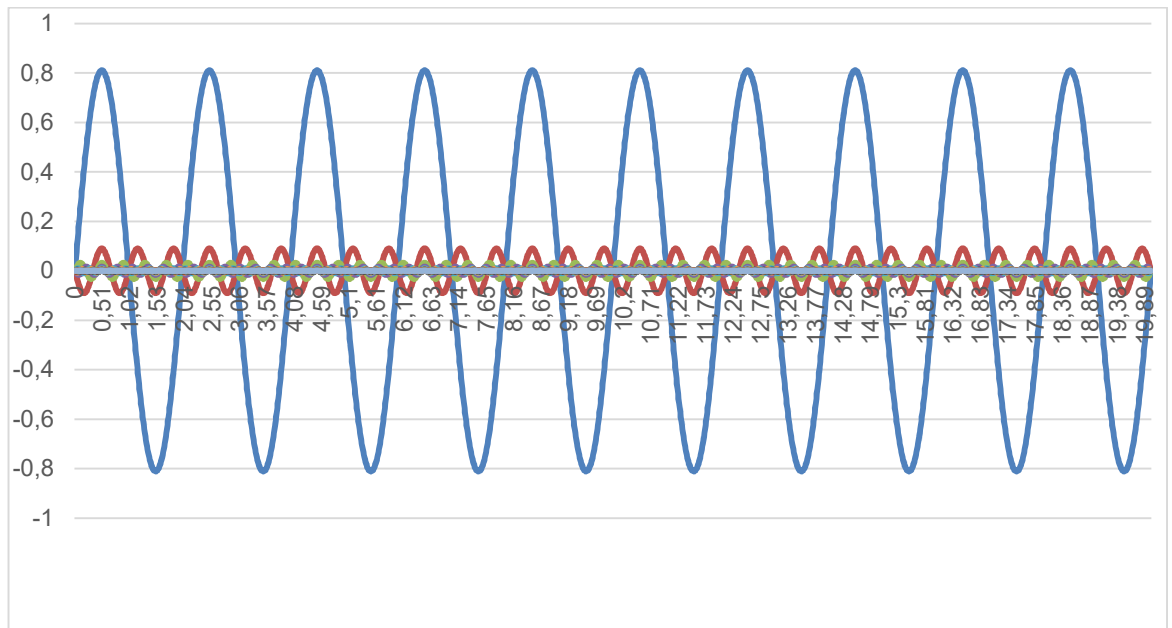
Pitää laskea jokainen aika nolasta kahteenkymmeneen mikrosekuntiin Excelin listoille.

Esimerkki. $t_1=0,1\text{ms}$: $f(t_1)_{\text{kolmioaalto}} = 1. \text{ harm.} + 3. \text{ harm.} + 5. \text{ harm.} + \dots + 49. \text{ harmoninen.}$

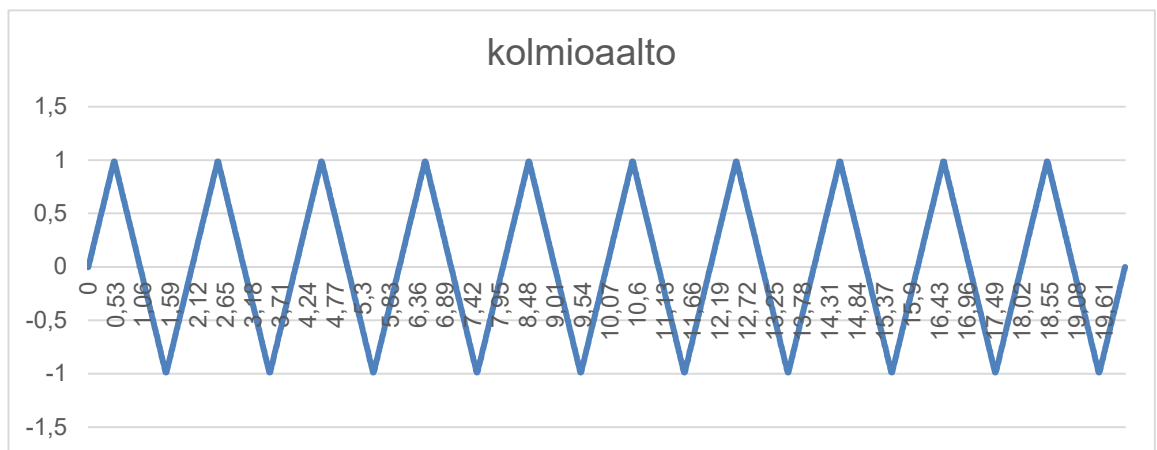
$t_2=0,2\text{ms}$: $f(t_2)_{\text{kolmioaalto}} = 1. \text{ harm.} + 3. \text{ harm.} + 5. \text{ harm.} + \dots + 49. \text{ harmoninen.}$

$t_3=0,3\text{ms}$: $f(t_3)_{\text{kolmioaalto}} = 1. \text{ harm.} + 3. \text{ harm.} + 5. \text{ harm.} + \dots + 49. \text{ harmoninen.}$

1. harmoninen aalto on pääsiniaalto, joka on suurin aalto. Pääsiniaallon huippu on 0,8. Muut pikkuharmoniset vaikuttavat huipun kasvua pääsiniaaltoon. Pikkuharmoniset muuttuvat pääsiniaaltoja kolmioaalloiksi ja huipuksi. Kolmioaallon huippu kasvattaa amplitudin yhteen arvoon asti (kuva 34 ja 35).



Kuva 33 Pikkuharmoniset vaikuttavat suureen siniseen aaltoon eikä muutu vielä kolmioaalloiksi.



Kuva 34 Kolmioaallot.

Luodaan siniaalto Excelillä Fourier-sarjan avulla. Yksinkertainen kaava $f(t) = A\sin(2\pi ft)$ on sama kuin vaihtojännite, mutta lisätään siihen kolme eri signaalia [Launonen ym. 2006: 188.]:

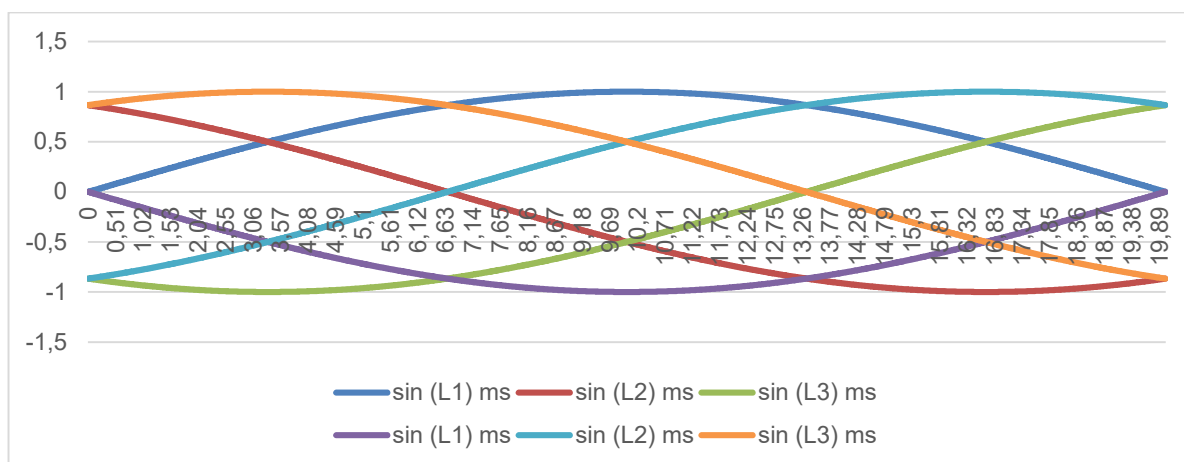
$$f(t) = A\sin(2\pi ft), f(t) = A\sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \text{ ja } f(t) = A\sin\left(2\pi ft + \frac{4\pi}{3}\right), \quad (29)$$

$$\text{siis vaihekulmat: } 0^0, \frac{2\pi}{3} = 120^0 \text{ ja } \frac{4\pi}{3} = 240^0 \quad (30)$$

Havainnoin ja tutkin, kuinka komparaattori toimii. Komparaattori toimii kolmioaallon tulo-signaalin, jolla on positiivisen ja negatiivisen puolella. Siniaalto katkaisee kolmioaallon yliamplitudia, mutta siniaalto pystyy havaitsemaan kolmioaallon positiivisen ja negatiivisen puolella myös. Lisäsin positiivisen siniaallon siniaaltoa negatiiviselle puolelle samalla, koska Excel ei havaitse kolmioaalloa negatiivisella puolella, jos vain siniaalto positiivisen puolella. Aiheutetaan, että Excel voi olla väärinymmärrys. [Haiko 2010: 327–328.]

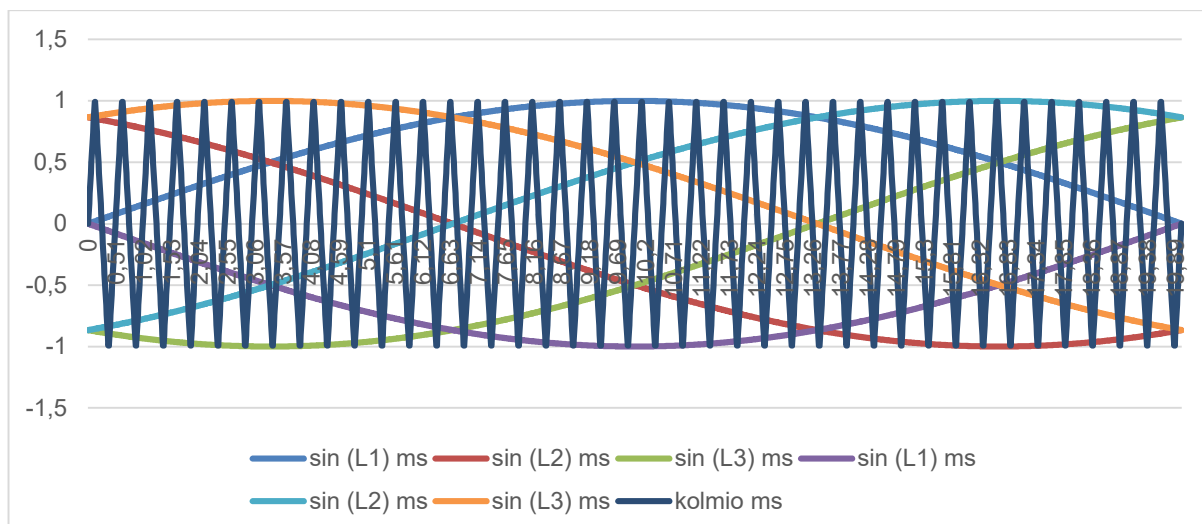
$$f(t) = -A\sin(2\pi ft) \quad (31)$$

Tehtiin kaksi eri säätöä ja kaksi amplitudia: $H_{z\text{sini}}$ ja $H_{z\text{kolmio}}$, A_{sini} ja A_{kolmio} . Ja toteutettiin se Excelin avulla.



Kuva 35

Sini-aallot.



Kuva 36 Pulssinleveysmodulaatiojen signaalit.

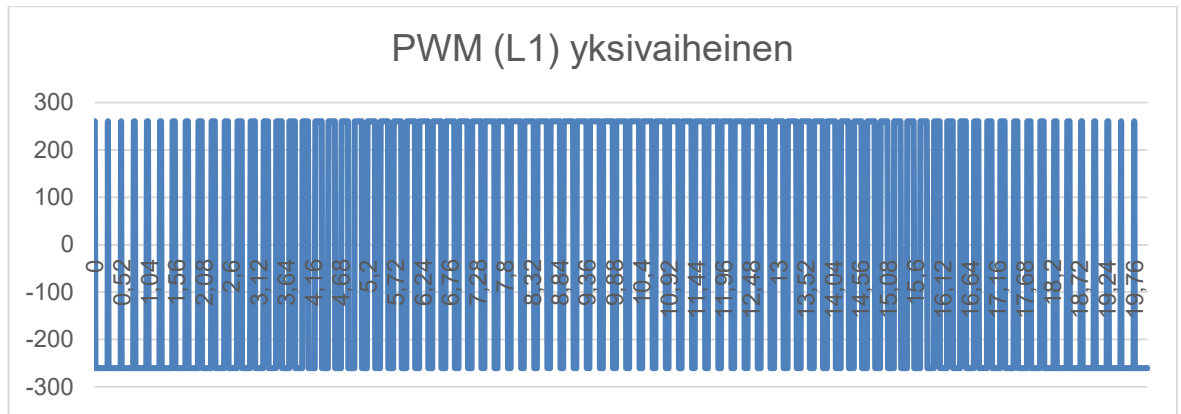
3.2 Säädetty pulssinleveysmodulaatio

Tutkittiin yksivaiheisen ja kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaation eroja. Yksivaiheinen ohjaa vain yhden vaiheen kuormituksella. Kolmivaiheinen ohjaa kolmivaiheeseen samanaikaisilla kuormituksilla ja ne vaikuttavat piiriin kuin yksivaiheinen.

Aiemmin on tehty laboratorion taajuusmuuttajan tehtävät vuonna 2016. Taajuusmuuttajan tehtävissä tehtiin mittaustulokset ja oskilloskoopin kuvat. Kuvissa on 20 %:n ja 100 %:n pyörimisnopeus. Tutkin ja havaitsin kuvien pulssinleveysmodulaation jännitteen käyttäytymisen analogioissa.

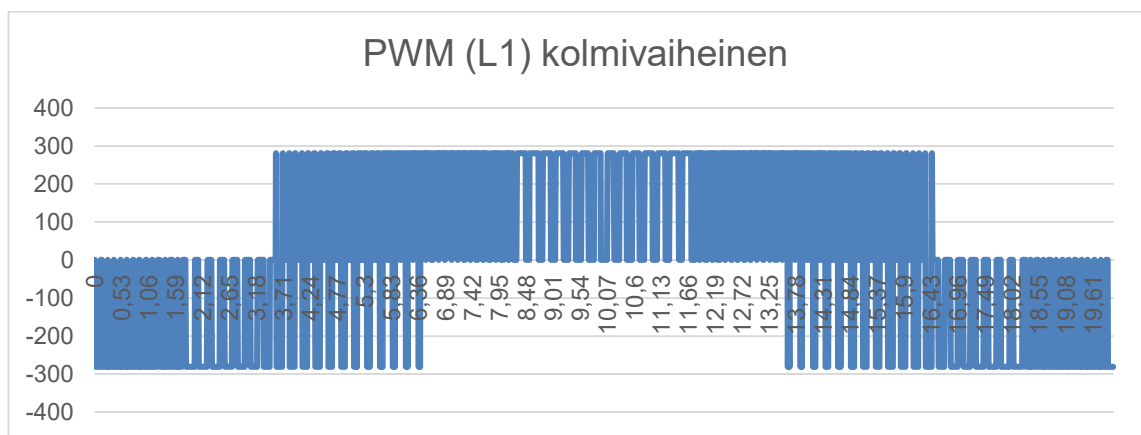
Tein eri yksivaiheisen ja kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaation kuvat Excelissä, yksivaiheisen ja kolmivaiheisen kuvat eivät ole samanlaiset.

Kuvassa 38 PWM (L1) yksivaiheisen vaihtosuuntaajan piirissä on neljä katkojaa, jotka ohjaavat kuormituksen suuntimat vuorolla negatiivisella ja positiivisella koko ajaksi.

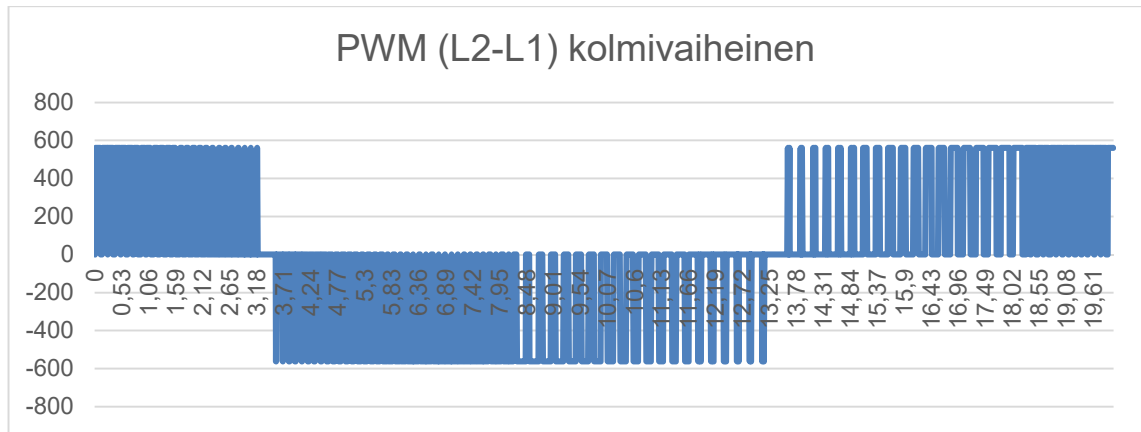


Kuva 37 Yksivaiheisen vaihtosuuntaajan pulssinleveysmodulaatio jännite

Kuvassa 39 PWM (L1) kolmivaiheisen ja PWM (L2-L1) kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan piirissä on kuusi katkojaa, jotka eivät ohjaa samaa kuin neljä katkojaa. Ne yhdistyvät kaikkiin kolmeen vaiheeseen vuoroon virralla. 1-vaihe tyhjästä pulssit negatiivisella ja positiivisella, 2-vaihe ja 3-vaihe ottavat käyttämään tyhjälle. Vaiheet alkavat olla suhteellisen. Kuvassa ei ole varma, koska ei ole tehty mittaukset moottorissa, jossa on sarjan resistanssia ja induktanssia jännitettä yksivaiheisen välillä.

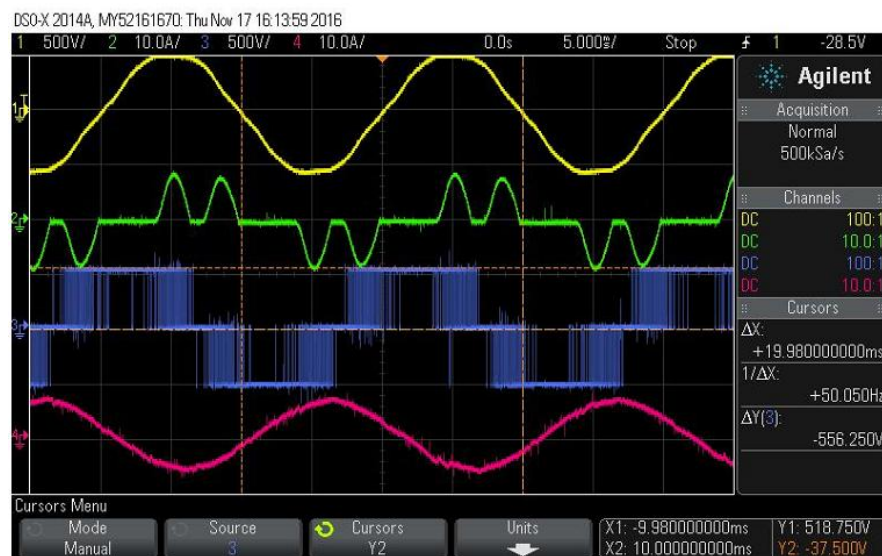


Kuva 38 kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaation 1-vaihe jännite

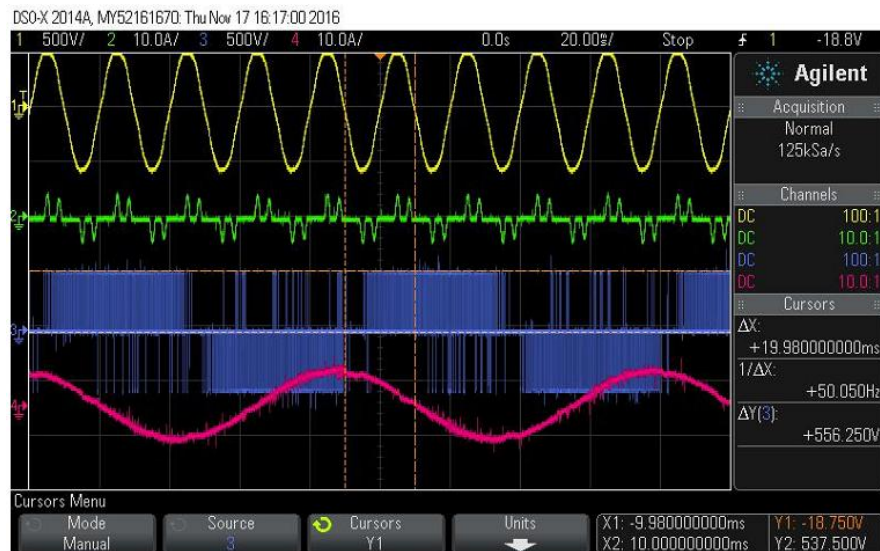


Kuva 39 Kolmivaiheisen pulssinleveysmodulaatiot, jotka yhdistyivät 1-vaihetta ja 2-vaihetta jännitteellä.

Otettiin oskilloskoopin analogiakuvat laboratoriosta. Havaittiin pulssinleveysmodulaation jännitettä kuvista. Tasajännitteen huippu pystyy aina 556V 20%:n ja 100%:n pyörimisnopeudella eikä laske, mutta 10Hz:n ja 20%:n pyörimisnopeus alenee tehollisarvoon 253V, kun 429V on 50Hz:n ja 100%:n pyörimisnopeus. On havaittu pulssinleveysmodulaation L2-L1 jännitettä, jolla on hieman sama kuin kuvissa on sinistä analogiaa jännitettä.



Kuva 40 100 %:n nimellispyörimisnopeus, sininen on vaihtosuuntaajan jännite, pinkki on vaihtosuuntaajan virta, vihreä on sähköverkon virta ja keltainen on sähköverkon vaihtojännite.



Kuva 41 20 %:n nimellisyörimisnopeus, sininen on vaihtosuuntaajan jännite, pinkki on vaihtosuuntaajan virta, vihreä on sähköverkon virta ja keltainen on sähköverkon vaihtojännite.

3.3 Induktanssi-ilmiö vaihtosuuntaajassa

Seuraavassa tutkitaan Excelin avulla, kuinka vaihtosuuntaaja vaikuttaa induktanssi-ilmiöön. On laskettu resistanssi ja induktanssi yhtälöiden mukaan moottorista. Virran kasvu on laskettu matemaattisesti ja Excelillä. Luettelojen moottorin kilpiarvot on saatu ABB:ltä, josta on tehty laskemaan moottorin kilpiarvojen kanssa resistanssin ja induktanssin kaavojen avulla, että on saatu resistanssin ja induktanssin vakioarvot (taulukko 2 ja kohta 2.7). Nimellisvirta muuttuu huippuvirraksi.

Nimellisvirta 20,9 A → Huippuvirta 29,56 A

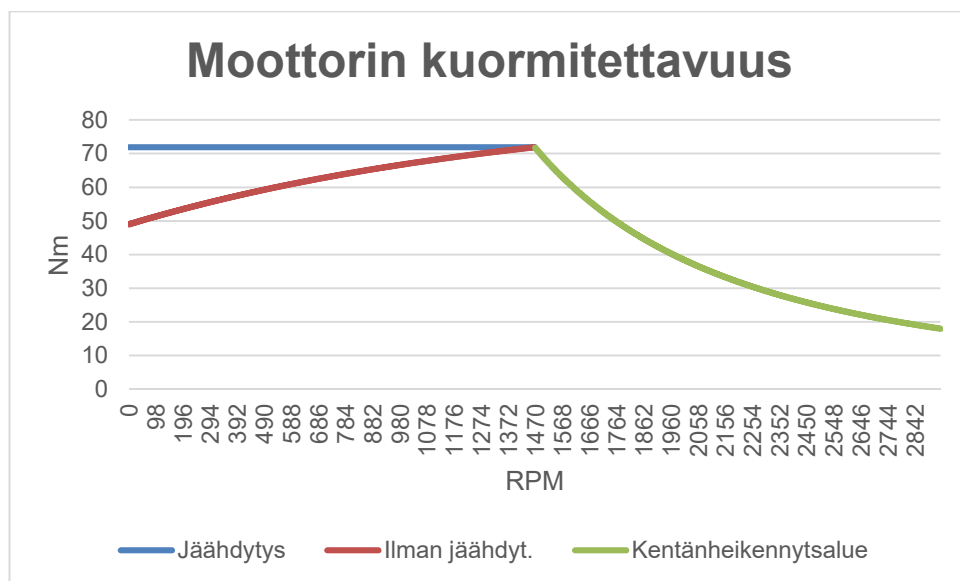
Laskettiin kilpiarvoista resistanssin ja induktanssin arvot 50Hz:llä:

Yksivaiheisen vaihtosuuntaajan kuormitus:

$$R = 9,24 \, \Omega$$

$$L = 18,91 \, \text{mH}$$

Resistanssi ja induktanssi ovat arvot rakenteen moottorissa eli nimellismomentin kuormituksella 50 Hz:nä. Jos moottorilla on jäähdytystä, voidaan käyttää nimellismomentin kuormitusta vakiovuoalueella. Ilman jäähdytystä ei voida käyttää nimellismomentin kuormitusta, Vähennetään kuormitus nimellismomentin kuormituksesta vakiovuoalueella. Kentänheikennysalueella pitää vähentää kuormitus nimellismomentin kuormituksesta. Nimellispyörimisnopeuden alle oleva nopeus on vakiovuoalue ja ylinopeus on kentänheikennysalue. Nimellispyörimisnopeuden ylinopeus alkaa vähentää momentin rajaa. Momentin raja ei suosittele ylikuormitusta pitkästi, kun aiheutetaan moottorin ylikuumeemista ja eliniän lyhyenemistä. [Hietalahti 2013: 69–70.]



Kuva 42 Nimellismomentin kuormitettavuuksien rajat.

Taulukko 2 ABBin luettelo valittiin liitteessä 8.

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B
IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cosφ	Current		Torque		Moment of inertia J = 1/4 GD²kgm²	Weight kg	Sound pressure Level L _{PA} dB	
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _n A	I ₂ /I _n	T _n Nm	T ₁ /T _n				T ₂ /T _n
1500 r/min = 4 poles				400 V 50 Hz			CENELEC-design								
11	M3BP 160MLA 4	3GBP162410-**G	1466	90,4	91,6	91,3	0,84	20,9	6,8	71,6	2,2	2,8	0,0810	135	62

Näin saatiin resistanssin ja induktanssin arvot. Piirrettiin rakenteen piiriä, jossa on neljä katkojaa, resistanssi ja induktanssi kuten esimerkki kuva 22. Ne luovat ja toimivat yksi-vaiheisen vaihtosuuntaaja. Näytetään toiminnan piirin, kuinka virran suuntimat kuljetaan piirillä (kuva 44 ja 45). Virtaa aloitetaan kytkemällä kytkimiset Q2 ja Q3 (kuva 45), että negatiivista virtaa kasvatetaan. Kytetään kytkimet Q1 ja Q4 (kuva 44), että positiivista

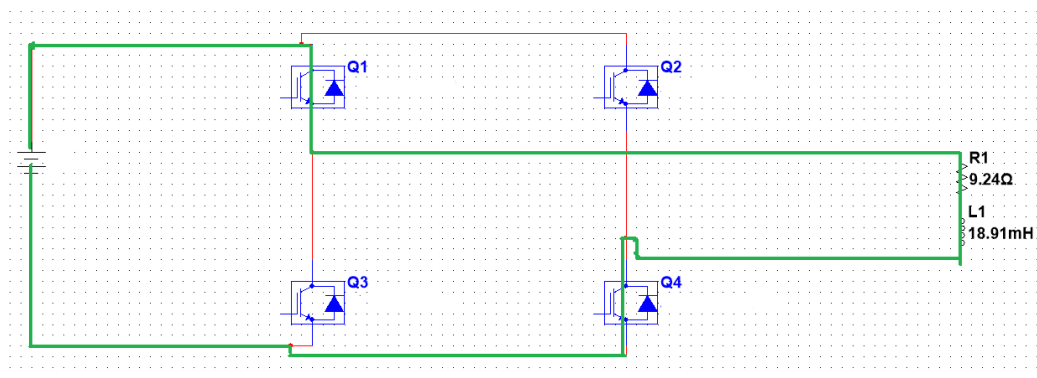
virtaa kuljetaan, mutta kuljetaan positiivista vastaan negatiiviseen, jota virtaa lasketaan. Virran yhtälöllä 32 ja 33 laskettiin toteutumaan näyttävää aaltovirtaa Excelillä (kuva 46).

Positiivinen virta i_0 :

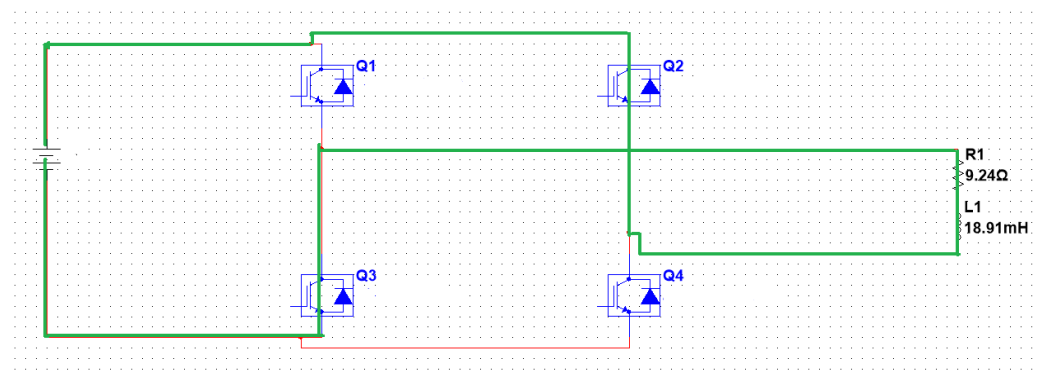
$$i = \frac{u}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = i_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (32)$$

Negatiivinen virta $-i_0$:

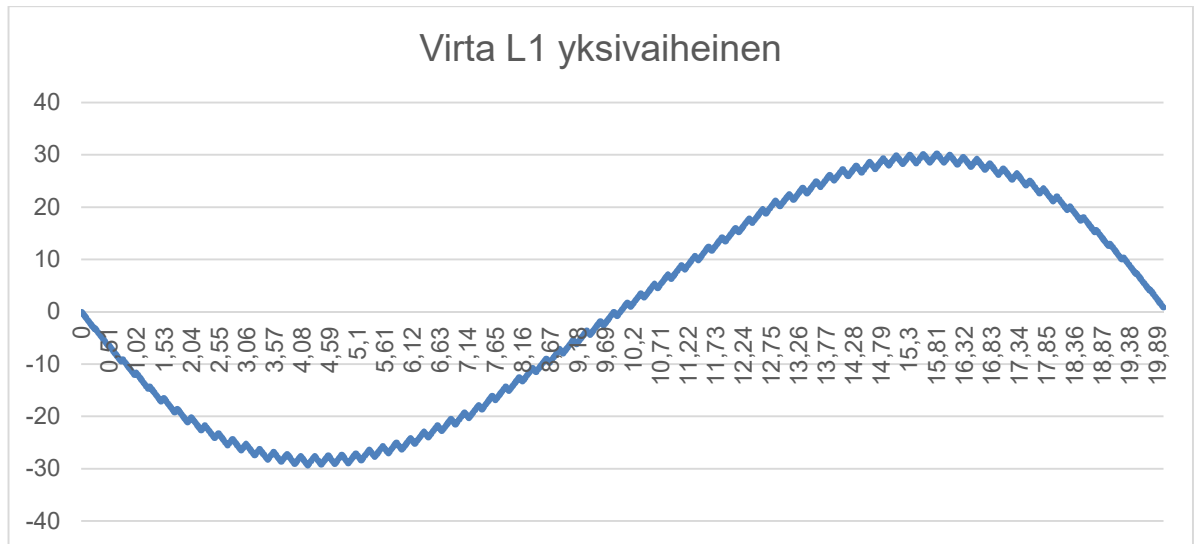
$$i = \frac{-u}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = -i_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (33)$$



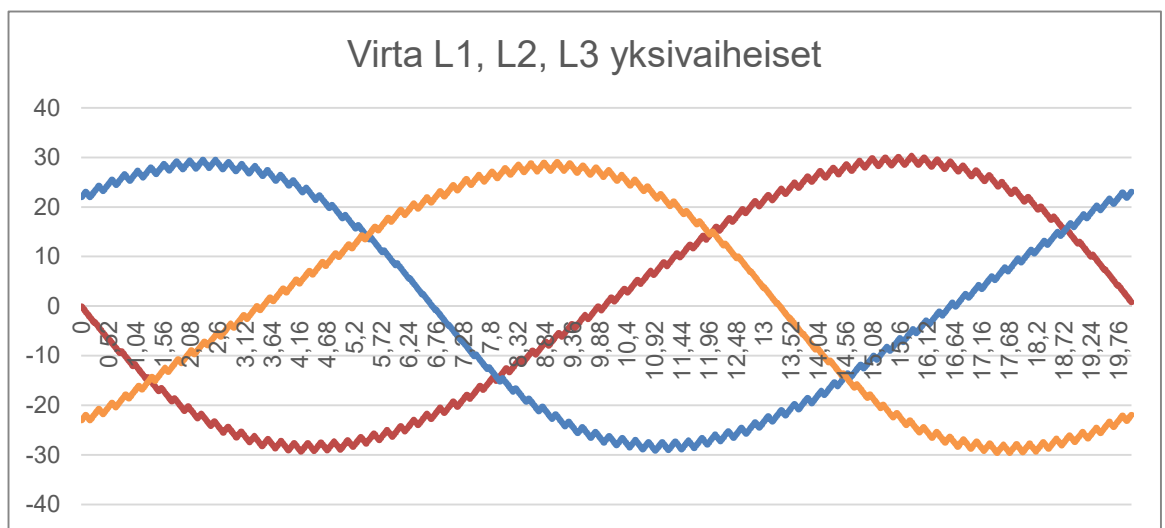
Kuva 43 Vaihtosuuntaajan positiivista virtaa suuntiin.



Kuva 44 Vaihtosuuntaajan negatiivista virtaa suuntiin.



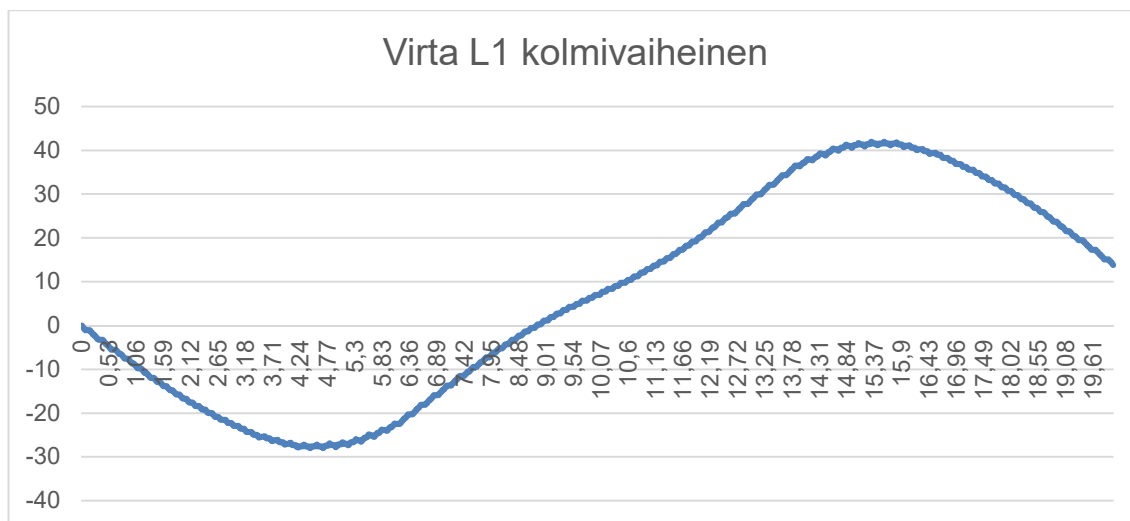
Kuva 45 Yksivaiheisen virta.



Kuva 46 Kolmivaiheisen virrat toteutuisivat kuvaa kuvailemiseen. Otettiin yksivaiheisten jokaista kolme vaihetta kuvalla.

3.4 Virran pieneneminen ja nolladiodi

Olen tehty vaikeasti kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan matemaattisen logiikalla. Olen yrittänyt ja pohdittu, kuinka teen logiikan ratkaisut ja luomaan Excelin kuvan. Ratkaisut ja kuva eivät ole helppoa. Olen kuitenkin onnistunut tuloksen kuvan, joka ovat epäaalto. Olen havaittu pulssinleveysmodulaatiot kolmivaiheisella vaihtosuuntaajalla, kun kulkevaa tasajännitettä katkaistaan vaihtosuuntaajan positiivisen ja negatiivisen välillä. Kuvasta 48 puuttuu virran pienenemisen yhtälö 20, kun aiheutetaan toteutumaan kuvaan 48.

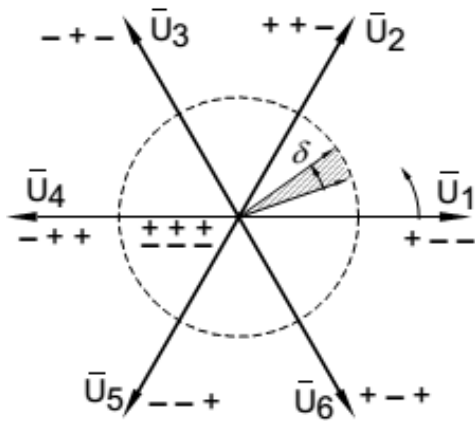


Kuva 47 Ilman pieneneminen virta laskeminen

On tehty ajan listat ohjaamasta Excelin avulla. Vaihtosuuntaajan välikatkaisemisen listat toteutettiin Excelillä. Katkaisun listat toteutettiin Excelillä. Kuvassa merkitsin punaiset rajat listoille, joissa on katkaisut positiivisen ja negatiivisen välillä. Listoilla on vihreät PWM L1, L2, L3, jotka seurattiin ohjaamasta. On havaittu, että vihreät pulssinleveysmodulaatiot ovat sama arvo punaisissa rajoissa. (Taulukko 3). On piirretty kuljettavan vihreän piirillä virran pienenemisenä. Ylhäällä on katkaissut ja alhaalla on kytkennän päällä tai päinvastoin. Virta kulkee nolladiodin kautta (kuva 50).

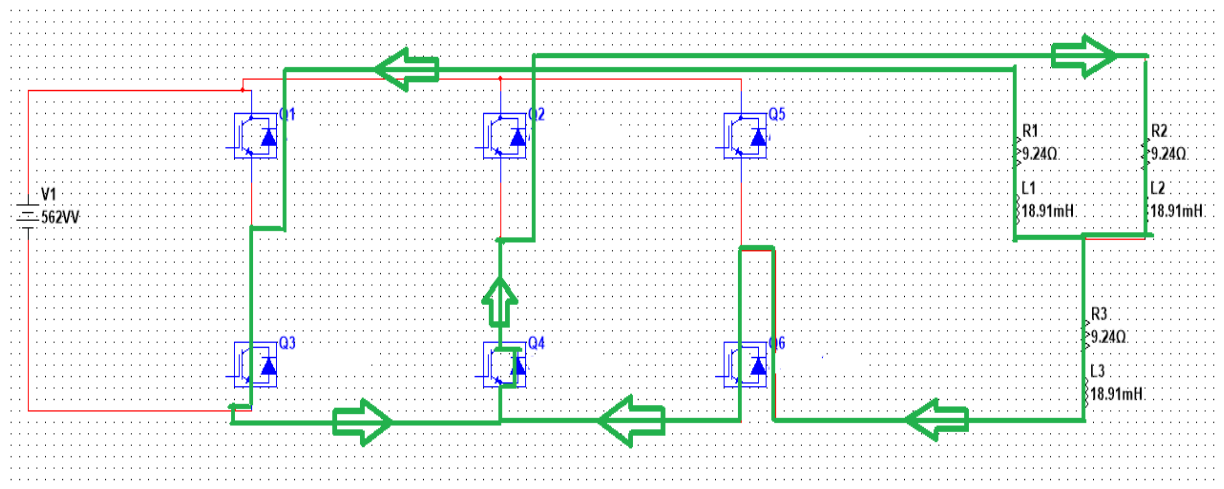
Pulssinleveysmodulointi toteutettiin jakamalla U:n kiertymiskulma teoriasta (kuva 49).

Kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan kytkimet ovat jännitevektoreja U1-U6 ja nollavektoria U7 ja U8 (+++ ja ---) (kuva 49). Nollavektori on nollajännite, joka on tyhjiä positiivisen ja negatiivisen kytkimillä välillä. Kuva 50 on nolladiodin virta, vaihtosuuntaajan kytkimet ovat Q1-Q6 ja Q7-Q8. Q7 = (Q1, Q2, Q5) ja Q8 = (Q3, Q4, Q6) ovat (+++ ja ---). [ABB:n TTT-käsikirja: 20.]



Kuva 48 Pulssinleveysmodulointi toteutetaan jakamalla U :n kiertymiskulma. [ABB:n TTT-käsikirja: 20.]

Pienenemisen virran vaikutus. Q1, Q2 ja Q5 ovat avannut kytkimet ja Q3, Q4 ja Q6 ovat sulkenut kytkimet, jotka vaikuttavat pienenemiseen virtaan nolladiodin kautta. Virta kulkee Q4: nolladiodin kautta. Kutsun tätä vaihtosuuntaajan välikatkaisemiseksi (Kuva 50).



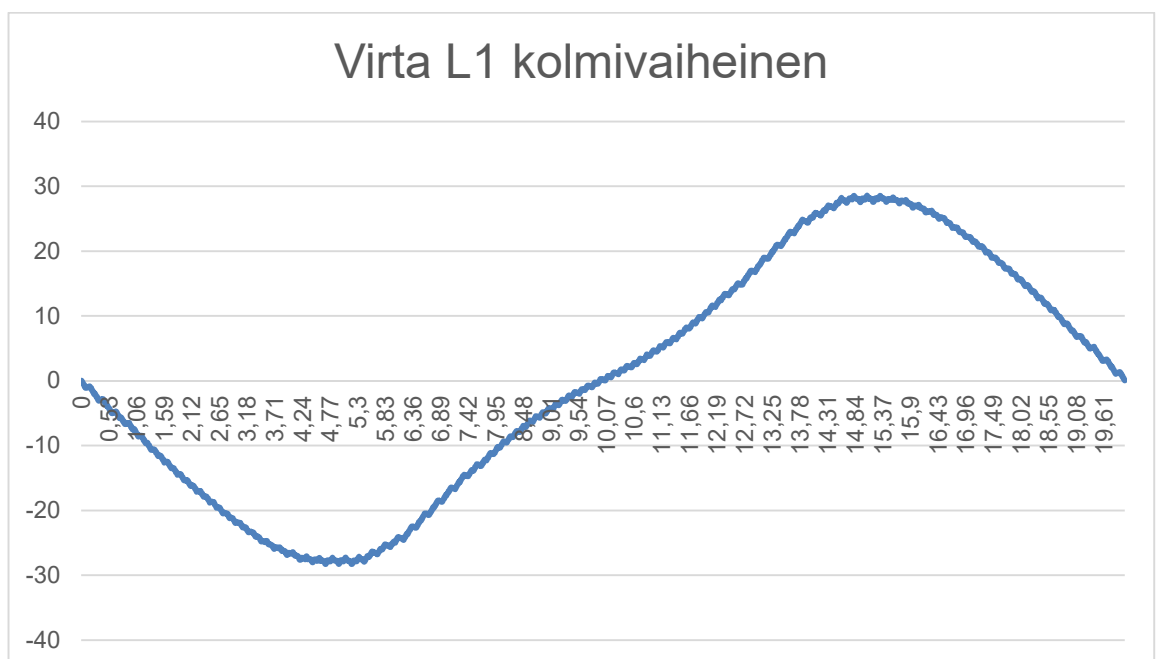
Kuva 49 Pienenemisen virran vaikutus.

Havaittu vaihtosuuntaajan välikatkaiseminen Excelin avulla, jolla on punainen merkki. Vihreät pulssinleveysmodulaatiot ovat kytkimet. Kytkimien sama aika on kolme negatiivista tai positiivista, jotka aiheuttavat vaihtosuuntaajan välikatkaisemisen (taulukko 3).

Taulukko 3 Vaihtosuuntaajanvälikatkaiseminen Excelin avulla

PWM L1	PWM L2	PWM L3	RMS calc.	L1 RMS	L2-L1
281	281	281	0	0	0
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	-281	-281	0	0	0
-281	-281	-281	0	0	0
-281	-281	-281	0	0	0
-281	-281	-281	0	0	0
281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562
281	281	281	0	0	0
281	281	281	315844	78361	562
-281	281	281	315844	78361	562

Olen korjannut/lisännyt virran pienenemisen laskemiseen yhtälöllä 20. Kuvaan 51 toteutettiin, mutta on vielä hieman epäaalto. Virran pienenemiset vaikuttavat hieman epäaaltoilta, koska yksivaiheisessa vaihtosuuntaajassa ei käytetä virran pienenemistä.



Kuva 51

Pienenemisen virran laskemisen mukaan. Vaihtosuuntaajanvälikatkaiseminen vaikuttaa hieman epäaaltoa tähän kuvaan.

Kolmivaiheisella pitää ottaa ohjausjärjestelmät elektroniikan säädöllä, että nykyaikaiset taajuusmuuttajat sisältävät kuten skalaariohjaus tai vektorisäätö, jotka vaikuttavat ohjaamaan pulssinleveysmodulaattorin kautta vaihtosuuntaajalle.

3.5 Pyörimisnopeuden säädön vaikutus vaihtosuuntaajan jännitteeseen

Siniaallon ja kolmioaallon komparaattorin vaikutus vaihtojännitteeseen 50 Hz:llä. 50 Hz:n vaihtosuuntaajan jännite on 380 V. Jännitteellä on 50 Hz, mutta siniaallon taajuus on 25 Hz komparaattoriin. Se vähentää puolia taajuutta siniaaltoon (taulukko 4).

Taulukko 4 100 % nimellispöörimisnopeus.

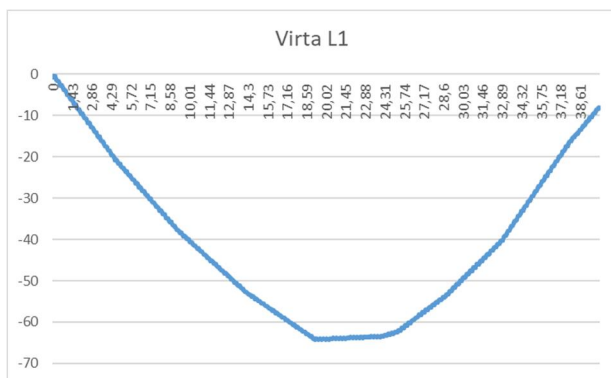
Sini amplitudi	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="-1"/>	
sinitaajuus	<input type="text" value="25"/>		
Kolmio Amp.	<input type="text" value="1"/>	kolmiotajuus	L2-L1 RMS
		<input type="text" value="2000"/>	
			384,4672

Vähennetään 20 % nimellispöörimisnopeutta, kun säädetään siniaaltoja ja siniaallon amplitudia. Siniaalto ohjaa jännitteen ja virran taajuutta. Siniaallon amplitudi ohjaa jännitteen tehollisarvoa. Vaihtosuuntaajan pääjännitteen tehollisarvo on 254 V 20 %:n pyörimisnopeudesta (taulukko5).

Taulukko 5 20 % nimellispöörimisnopeudesta.

Sini amplitudi	<input type="text" value="0,56"/>	<input type="text" value="-0,56"/>	
sinitaajuus	<input type="text" value="5"/>		
Kolmio Amp.	<input type="text" value="1"/>	kolmiotajuus	L2-L1 RMS
		<input type="text" value="2000"/>	
			256,6193

Kuvan 52 aallolla aiheutetaan ylivirtaa ja epäaalloa.



Kuva 52 20 % nimellispöörimisnopeudesta epäaalto.

Toinen vaihtoehto tavalla (taulukko 6):

Taulukko 6

Sini ampli-
tudi

0,27	-0,27
------	-------

sinitaajuus

5

Kolmio Amp.

1

kolmiotaaajuus

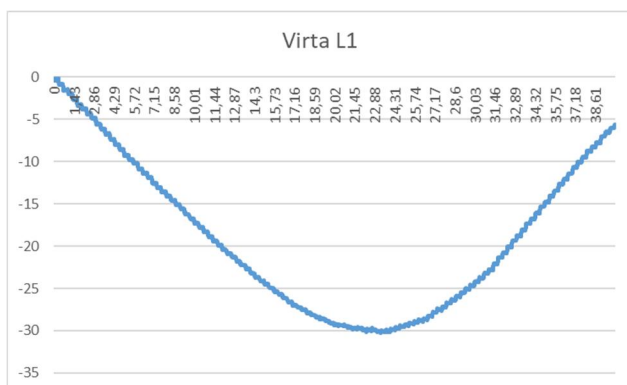
1500

L2-L1

RMS

180,8034

Kuvan 53 aallolla korjataan siniaallon amplitudi ja kolmiotaaajuus, jotka vaikuttavat parempaan suuntaan, mutta pääjännite lasketaan.



Kuva 53 20 % nimellispöörimisnopeudesta siisti aalto.

Kasvatetaan 130 % nimellisyörimisnopeutta, kun säädetään siniaallon amplitudi ja siniaalto. Vaihtosuuntaajan pääjännite pysyy 380 V:na (taulukko 7).

Taulukko 7 130 % nimellisyörimisnopeutta.

Sini amplitudi

1,3	-1,3
-----	------

sinitaajuus

32,5

Kolmio Amp.

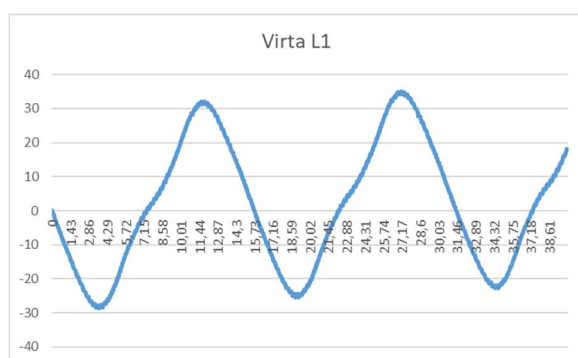
1

kolmiotaaajuus

2000

L2-L1
RMS

380,9597



Kuva 54 130 % nimellisyörimisnopeutta.

4 Tulokset ja pohdinta

4.1 Tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan piirit

Tasasuuntaajalla kuusi pulssia diodisiltakytkentä tai tyristorisiltakytkentä on parempi kuin muut vaihtoehdot. Kuusi pulssia vähentävät tasajännitteen aaltoja ja kasvattavat hyvin korkeata tasajännitettä. Jännitevälipiirillä on kapasitanssi, kun muutetaan tasajännitettä tasaamiseksi.

Kuusi pulssia diodisiltakytkentä on ongelma käynnistyskytkimissä, jotka aiheuttavat virtasysäystä. Lisäksi diodisiltakytkennän kytkimiä ei voida avata tai sulkea, jos ei käytetä käynnistyskuormitusta. Lisätään NTC-vastus tai käynnistysvastus korvamaan jännitevälipiirillä pois virtasysäykset. [Hietalahti 2011: 72.]

Kuusi pulssia tyristorisiltakytkennällä on erilaiset täysin ja puoli ohjattu diodisiltakytkentä, jotka voidaan avata päältä kytkimiltä, kun ilman käynnistyskuormitus. Ohjattu diodisiltakytkentä välttää suurta käynnistysvirtasysäystä, koska ohjattu diodisiltakytkentä voi ohjata pientasajännitettä lähin nollan alusta, kun aiheutetaan pientä käynnistysvirtasysäystä, sitten ohi käynnistysvirtasysäyksen jälkeen voidaan kasvattaa jännitettä korkeaan tasajännitteeseen asti. Suuri käynnistysvirtasysäys aiheuttaa komponentin eliniän lyhyenemistä tai tuhoisuutta. [Hietalahti 2011: 72.]

Täysin ohjatussa diodisiltakytkennässä vaaditaan enemmän elektroniikan komponentteja ohjaamaan kuin puoliohjatussa diodisiltakytkennässä. Puoli diodisiltakytkennällä ohjataan vain positiivista jännitettä nollasta korkeaan tasajännitteeseen asti riittävästi ja vähennetään elektroniikan komponentteja ohjaamalla. Tehoelektroniikan komponentit ovat GTO- tai IGCT-tyristorit, joita käytetään ohjatun diodisiltakytkennän piirillä.

Vaihtosuuntaajaan vaaditaan kuusi katkojaa, jotka ovat tehoelektroniikan komponentit. Tehoelektroniikan komponentit ovat IGBT-transistorit.

On otettava huomioon, että tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan komponentit kestävät tasajännitettä ja virtaa oikosulkumoottorista ja jännitevälipiiristä.

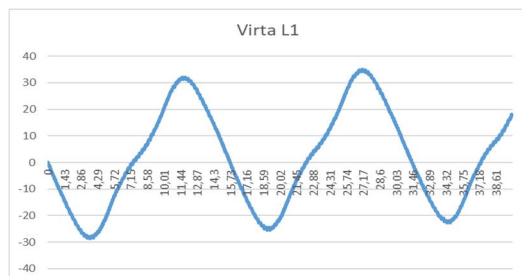
4.2 Pulssinleveysmodulaatio elektroniikan piirit

Pulssinleveysmodulaatiota vaaditaan elektroniikan komponentteja, joissa on kolme komparaattoria. Kolmella komparaatiolla tarvitaan kolmioaalto-oskillaattorin piirin ja kolme eri siniaalto-oskillaattorin piiriä, jotka toteuttavat ohjaamisen kolmivaiheisella. Vain kolme pulssinleveysmodulaatiota eivät ohjaa vaihtosuuntaajaa riittävästi, koska kolmivaiheisen vaihein pulssinleveysmodulaatiot aiheuttavat tyhjiä positiivisen ja negatiivisen välejä vaihtosuuntaajasta. Virran pienenemiset vaikuttavat hieman epäaallolta kuvissa. Tarvitaan säädetyn sähkömoottorikäytön ohjausjärjestelmäratkaisut elektroniikan säädöllä. Ohjausjärjestelmät voivat korjata tai poistaa tyhjiä välejä vaihtosuuntaajasta, joka muutetaan siistiksi virran aalloksi.

Ohjausjärjestelmiä tarvitaan kiertokenttäkoneiden säädetyin käyttöjen teoriasta ja tapojen säätöjen rakenteista. Säättöjen vaihtoehdot ovat skalaariohjaus ja –säättö, vektorisäättö ja suora vääntömomentin säättö (DTC).

Pulssinleveysmodulaatiot toteutetaan jakamalla U:n kiertymiskulma teoriasta. (kohta 3.4. kuvassa 49). [ABB:n TTT-käsikirja: 20.]

Ilman ohjausjärjestelmää kolmivaiheisella aiheutetaan ylivirtaa tai oikosulkuvirtaa. Kuvan 55 mukaan kolmivaiheisen aaltovirta alkaa kasvaa vähän ylös. Myöhemmin lopussa on ylivirtaa tai oikosulkuvirtaa. Oikosulkuvirta voi kasvattaa liian suurta virtaa.



Kuva 55 130 %:n nimellispyörimisnopeus.

5 Yhteenvedo

Opinnäytetyö tavoite oli lisätä ymmärrystä taajuusmuuttajan toiminnasta, jotta vältetään virheet, riskit ja tuhoamiset. Teorian tutkiminen sekä siihen pohjautuvat hyvät suunnitelmat ovat tärkeitä omalle kehitymiselle.

Kehittymisen avulla voi saada ideoita uusien tekniikoiden kehittämiseksi. Simulointi on hyödyllistä, koska se vaikuttaa säästämiseen ja on turvallista. Samalla opitaan käyttämään simulointia järjestelmän kehittämiseksi. Kannattaa oppia matematiikkaa ja logiikkaa, jolloin on mahdollista luoda edullista simulointia. Rakennetaan piirit, jotta ymmärretään niiden toiminnan teoriaa. Luotettavat simuloinnit ja piirit ovat edellytys järjestelmän kehittämisen pohtimiselle.

Excel on hyvä apuväline tutkimiseen. Sähkölaitteen ja sähkömoottorin analogian arvot ja ajat voidaan lukea havaitsemalla. Analogialla havaitaan piirien ongelmat ja virheet, kun ymmärretään, mitä ongelmat ovat. Täytyy osata käyttää Excelin logiikkaa ja matematiikkaa, kun luodaan simulointia. Excelin avulla eri tekniikoiden simulointi on halpaa ja helppoa.

Kun halutaan luoda jotakin uutta, täytyy hallita erilaisia tekniikan monimutkaisia teorioita. Esimerkiksi pelkkä sähkötekniikka ei ole riittävää, vaan pitäisi hallita monta muuta tekniikkaa ja teoriaa elektroniikasta, fysiikasta, tehoelektroniikasta, matematiikasta, jne. Tämä osaaminen yhdistyy ymmärtämiseksi, kun on tavoitteena luoda jotakin uutta.

Lähteet

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, Luku 16: Tehoelektroniikka.

Ahoranta, J. 2008. Sähkötekniikka. Porvoo: WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A.J. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Porvoo: WSOYpro Oy.

Best of Elektronik. 2010. Verkkoaineisto. Florian KURCZ.

<<http://www.kurcz.at/frequenzsechsfach.php>>. Päivitetty 27.3.2018. Luettu 27.3.2018.

Electrical engineering. 2018. Verkkoaineisto. Stack Exchange.

<electronics.stackexchange.com/questions/12851/why-is-three-phase-offset-by-120-degrees>. Päivitetty 27.3.2018. Luettu 27.3.2018.

Fourier series examples: Even Triangle Wave (Cosine Series). 2015. Verkkoaineisto. Swarthmore.

<<http://lpsa.swarthmore.edu/Fourier/Series/ExFS.html>>. Päivitetty 27.3.2018. Luettu 27.3.2018.

Haiko, T. 2010. Analoginen elektroniikka. Helsinki: WSOYpro Oy.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2012. Säädetty sähkömoottorikäytöt. Tampere: Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Tammertekniikka.

Inkinen, P.; Manninen, R. & Tuohi, J. 2011. Momentti 2: Insinöörifysiikka. Keuruu: Otava.

Launonen, E.; Sorvali, E. & Toivonen, P. 2006. Teknisten ammattien matematiikka 3E. Porvoo: WSOY Oppimateriaalit Oy.

Niiranen, J. 2007. Tehoelektroniikan komponentit. Helsinki: Otatieto.

Pulse width modulation (PWM) components. 2018. Verkkoaineisto. Multisim. <www.multisim.com/help/components/pulse-width-modulation-pwm-components/>. Päivitetty 27.3.2018. Luettu 27.3.2018.

Toivonen, P. & Sorvali, E. 2013. TAM plus. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

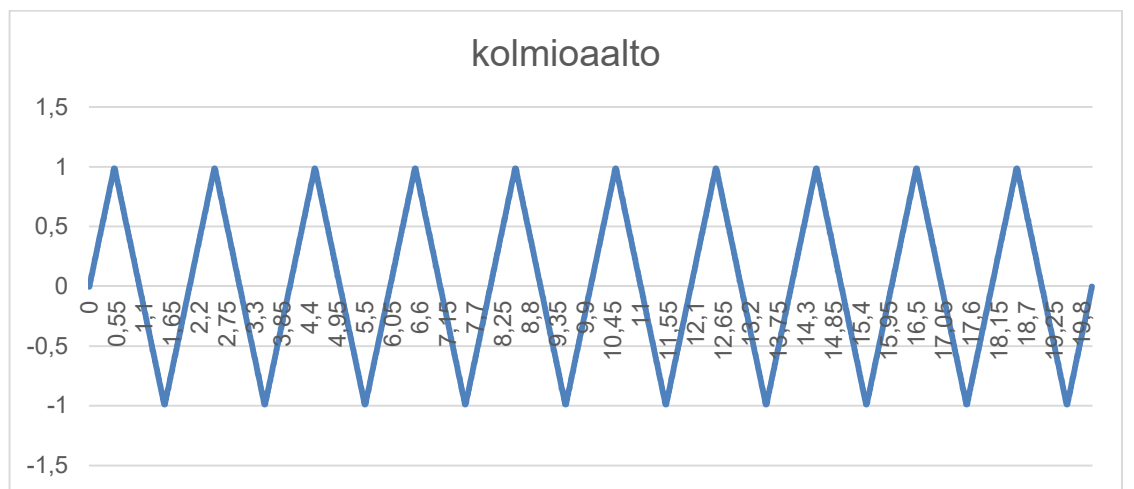
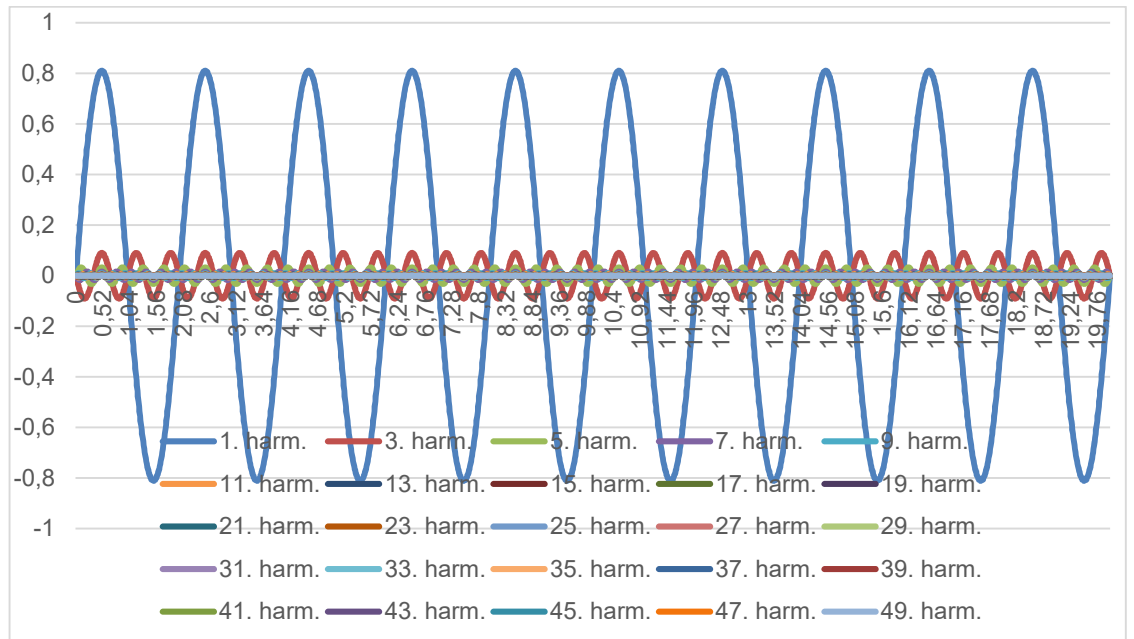
Troubleshooting variable speed drivessingle phase pulse width modulation (PWM) inverter. 2016. Verkkoaineisto. Machinery equipment online. <machineryequipmentonline.com/electric-equipment/troubleshooting-variable-speed-drivessingle-phase-pulse-width-modulation-pwm-inverter/>. Päivitetty 27.3.2018. Luettu 27.3.2018.

Viitanen, T. 2005. Space Vector Moddulation of Boost-Type Three-Phase, Three-Switch and Three-Level Unidirectional PWM Rectifier – Analysis and Implementation. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

11V-F Control of Single Phase PWM Inverter using dsPIC30F4011. 2017. Verkkoainesisto. Pantechsolutions. <www.pantechsolutions.net/dspic-projects/v-f-control-of-single-phase-pwm-inverter-using-dspic30f4011>. Päivitetty 27.3.2018. Luettu 27.3.2018.

Liitteen otsikko

Liite 1. Excelin kolmioaalto ja harmoniset



Valmis

kolmioaalto - Excel

Kerro, mitä haluat tehdä...

Tiedosto

Aloituis

Lisää

Sivun asettelu

Kaavat

Tiedot

Tarkista

Näytä

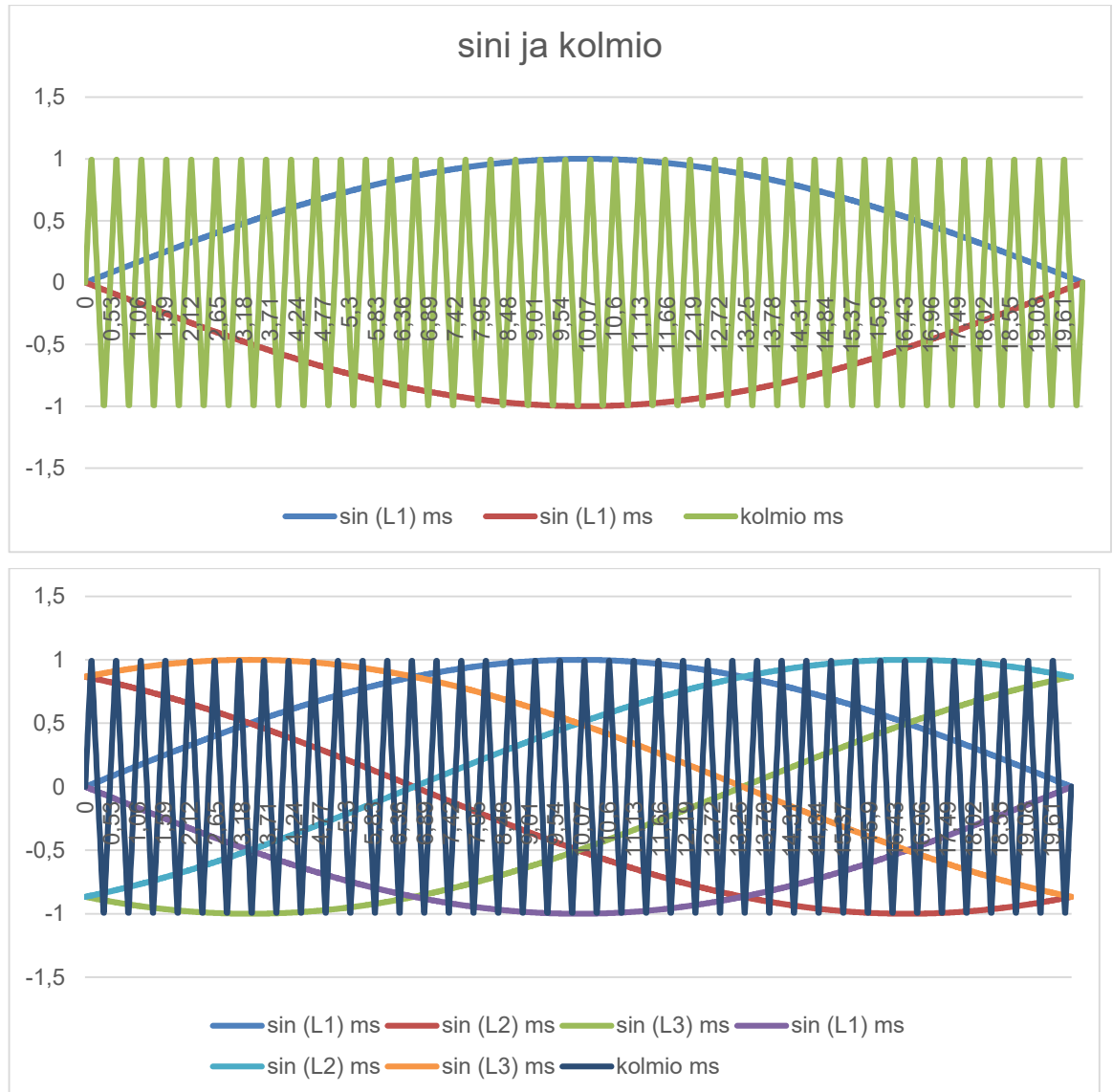
Apuohjelmat

Foxit PDF

Team

AB12

Liite 2. Excelin siniaallot ja kolmioaalto



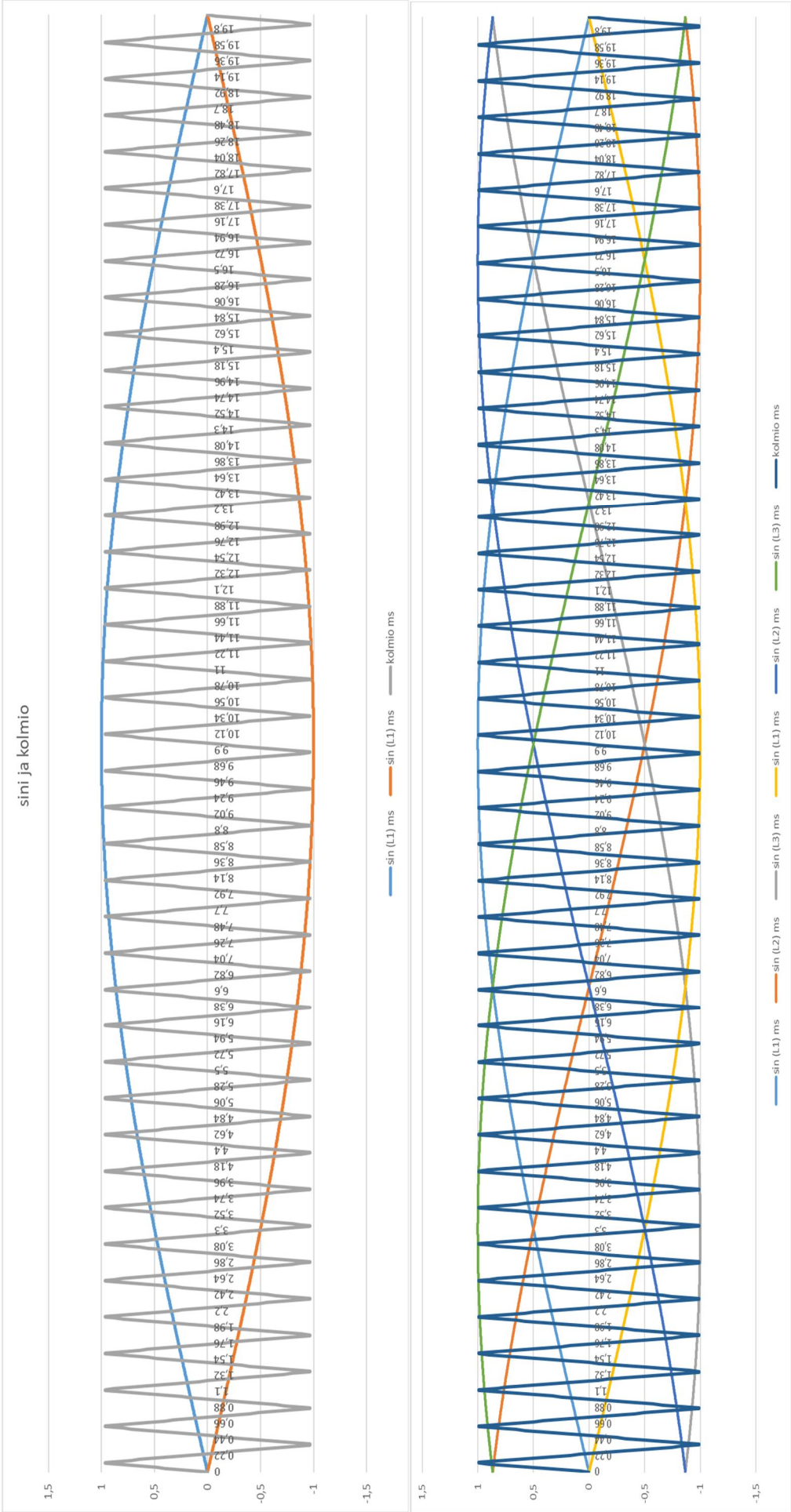
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4	t	sin (L1)	sin (L2)	sin (L3)	sin (L1)	sin (L2)	sin (L3)	kolmio	
5	ms								
6	0	0	0,866	-0,866	0	-0,866	0,866	0	
7	0,01	0,0016	0,8652	-0,867	-0,002	-0,865	0,8668	0,0818	
8	0,02	0,0031	0,8645	-0,868	-0,003	-0,864	0,8676	0,1658	
9	0,03	0,0047	0,8637	-0,868	-0,005	-0,864	0,8684	0,248	
10	0,04	0,0063	0,8629	-0,869	-0,006	-0,863	0,8691	0,3285	
11	0,05	0,0079	0,8621	-0,87	-0,007	-0,862	0,8699	0,4117	
12	0,06	0,0094	0,8613	-0,871	-0,008	-0,861	0,8707	0,495	
13	0,07	0,011	0,8605	-0,871	-0,011	-0,86	0,8715	0,5765	
14	0,08	0,0126	0,8597	-0,872	-0,013	-0,86	0,8722	0,6581	
15	0,09	0,0141	0,8589	-0,873	-0,014	-0,859	0,873	0,7417	
16	0,1	0,0157	0,8581	-0,874	-0,016	-0,858	0,8738	0,8241	
17	0,11	0,0173	0,8573	-0,875	-0,017	-0,857	0,8745	0,9056	
18	0,12	0,0188	0,8564	-0,875	-0,019	-0,856	0,8753	0,9927	
19	0,13	0,0204	0,8556	-0,876	-0,02	-0,856	0,8761	0,9927	
20	0,14	0,022	0,8548	-0,877	-0,022	-0,855	0,8768	0,9056	
21	0,15	0,0236	0,854	-0,878	-0,024	-0,854	0,8776	0,8241	
22	0,16	0,0251	0,8532	-0,878	-0,025	-0,853	0,8783	0,7417	
23	0,17	0,0267	0,8524	-0,879	-0,027	-0,852	0,8791	0,6581	
24	0,18	0,0283	0,8515	-0,88	-0,028	-0,852	0,8798	0,5765	
25	0,19	0,0298	0,8507	-0,881	-0,03	-0,851	0,8806	0,495	
26	0,2	0,0314	0,8499	-0,881	-0,031	-0,85	0,8813	0,4117	
27	0,21	0,033	0,8491	-0,882	-0,033	-0,849	0,882	0,3285	
28	0,22	0,0346	0,8482	-0,883	-0,035	-0,848	0,8828	0,248	
29	0,23	0,0361	0,8474	-0,884	-0,036	-0,847	0,8835	0,1658	
30	0,24	0,0377	0,8466	-0,884	-0,038	-0,847	0,8843	0,0818	
31	0,25	0,0393	0,8457	-0,885	-0,039	-0,846	0,885	-1E-17	
32	0,26	0,0408	0,8449	-0,886	-0,041	-0,845	0,8857	-0,082	
33	0,27	0,0424	0,844	-0,886	-0,042	-0,844	0,8864	-0,166	
34	0,28	0,044	0,8432	-0,887	-0,044	-0,843	0,8872	-0,248	
35	0,29	0,0455	0,8424	-0,888	-0,046	-0,842	0,8879	-0,329	

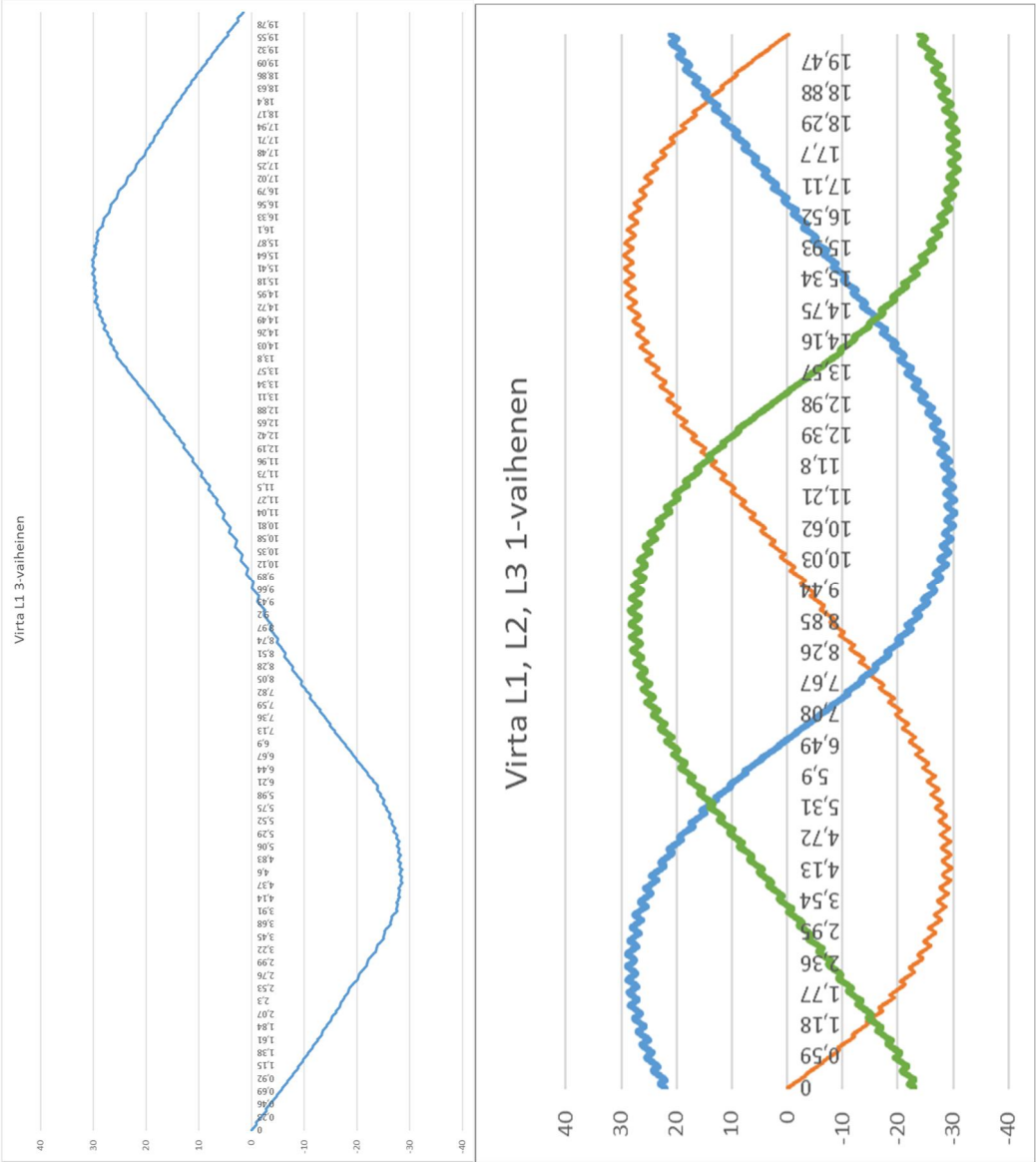
Liite 4. Induktanssin virrat, jännitteet ja kytkimen ajat

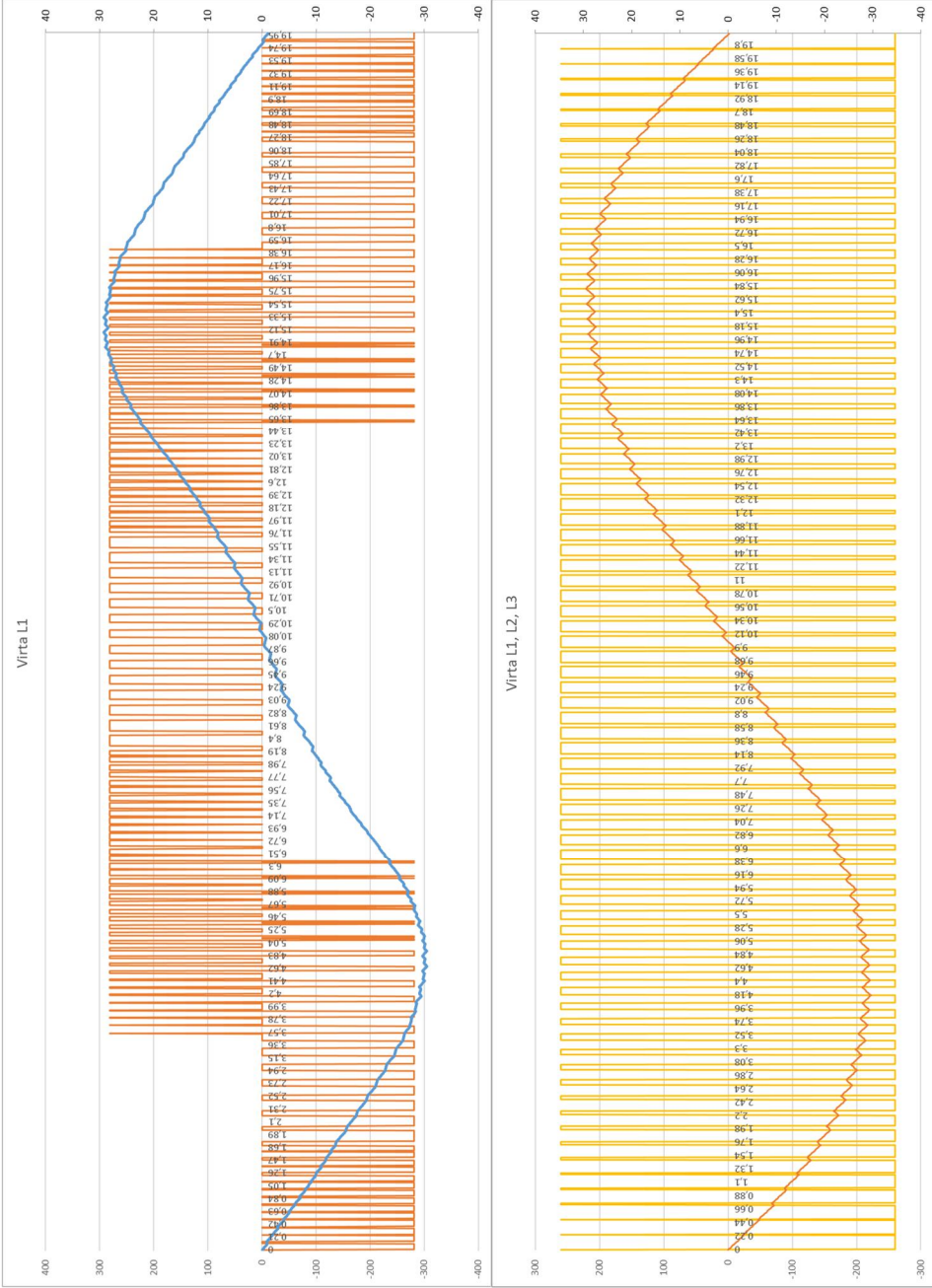
AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW
RMS calc.	L1 RMS	L2-L1	L2-L1	PWM L2	PWM L1	PWM L10												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	22	-23	-0,0388
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22,704	-0,1976
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22,555	-0,2365
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22,407	-0,3353
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22,259	-0,4341
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-22,111	-0,5329
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21,962	-0,6318
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21,814	-0,7306
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21,666	-0,8294
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21,518	-0,9282
0	0	0	0	0	0	0	EPATOSI	0,4204718	1,3685392	0	0	0	0	0	0	0	-21,370	-0,9281
0	0	0	0	0	0	0	EPATOSI	0,4204718	1,3685392	0	0	0	0	0	0	0	-21,222	-0,9279
0	0	0	0	0	0	0	EPATOSI	0,4204718	1,3685392	0	0	0	0	0	0	0	-21,074	-0,9277
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,926	-0,9275
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,778	-0,9273
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,630	-0,9271
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,482	-0,9269
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,334	-0,9267
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,186	-0,9265
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20,038	-0,9263
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19,890	-0,9261
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19,742	-0,9259
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19,594	-0,9257
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19,446	-0,9255
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19,298	-0,9253
0	0	0	0	0	0	0	EPATOSI	0,4204718	1,3685392	0	0	0	0	0	0	0	-19,150	-0,9251
0	0	0	0	0	0	0	EPATOSI	0,4204718	1,3685392	0	0	0	0	0	0	0	-19,002	-0,9249
0	0	0	0	0	0	0	EPATOSI	0,4204718	1,3685392	0	0	0	0	0	0	0	-18,854	-0,9247
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18,706	-0,9245
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18,558	-0,9243
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18,410	-0,9241
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18,262	-0,9239
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-18,114	-0,9237
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,966	-0,9235
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,818	-0,9233
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,670	-0,9231
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,522	-0,9229
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,374	-0,9227
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,226	-0,9225
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-17,078	-0,9223
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,930	-0,9221
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,782	-0,9219
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,634	-0,9217
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,486	-0,9215
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,338	-0,9213
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,190	-0,9211
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,042	-0,9209
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,894	-0,9207
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,746	-0,9205
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,598	-0,9203
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,450	-0,9201
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,302	-0,9199
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,154	-0,9197
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-15,006	-0,9195
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14,858	-0,9193
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14,710	-0,9191
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14,562	-0,9189
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14,414	-0,9187
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14,266	-0,9185
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-14,118	-0,9183
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,970	-0,9181
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,822	-0,9179
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,674	-0,9177
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,526	-0,9175
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,378	-0,9173
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,230	-0,9171
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-13,082	-0,9169
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,934	-0,9167
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,786	-0,9165
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,638	-0,9163
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,490	-0,9161
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,342	-0,9159
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,194	-0,9157
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-12,046	-0,9155
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-11,898	-0,9153
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-11,750	-0,9151
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-11,602	-0,9149
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-11,454	-0,9147
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-11,306	-0,9145
315844	78361	562	562	281	-281	0	TOSI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-11,158	-0,9143
315844	78361	562	562	28														

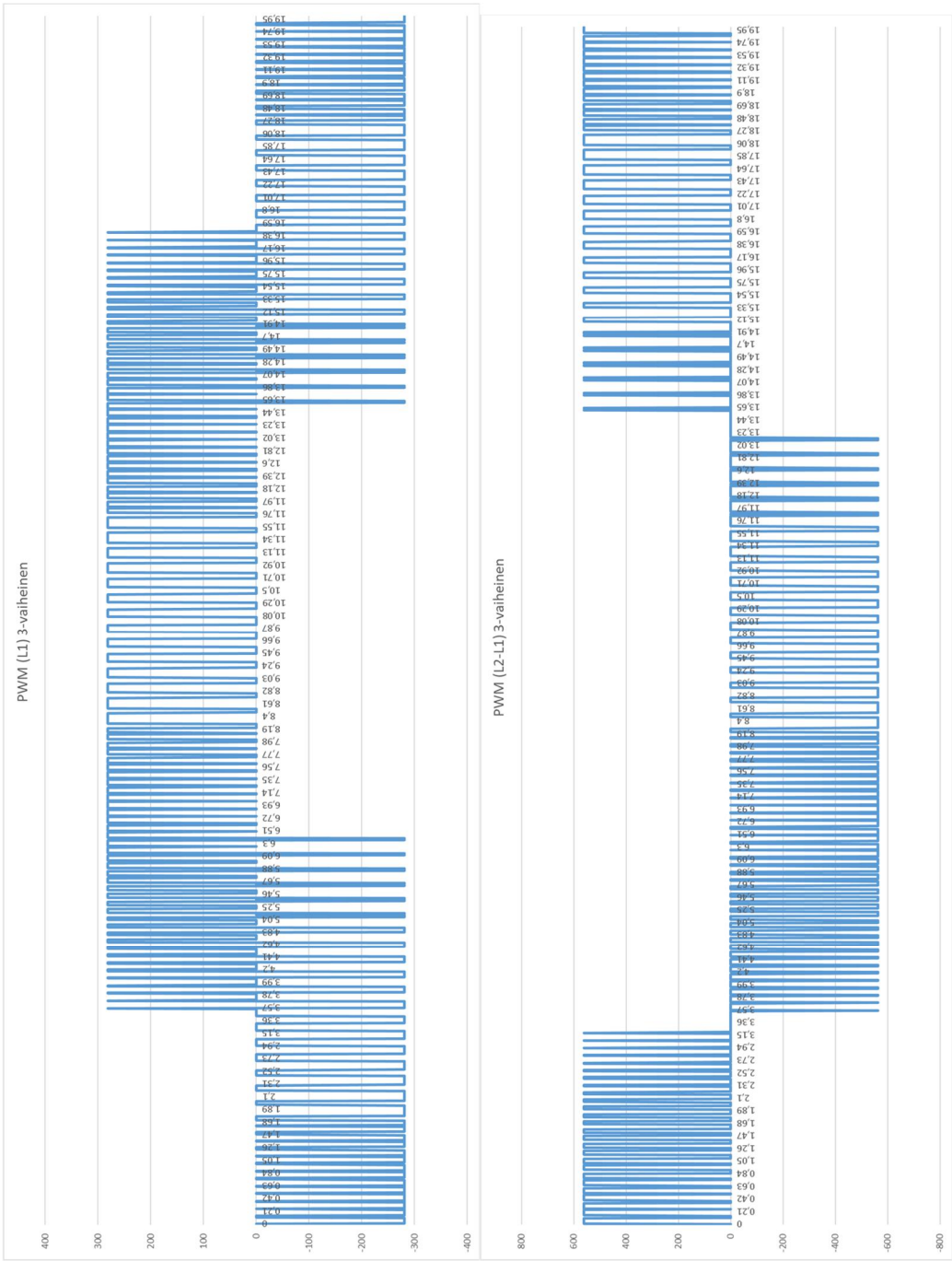
Liite 5. Tehnyt koko Excelin kuvat



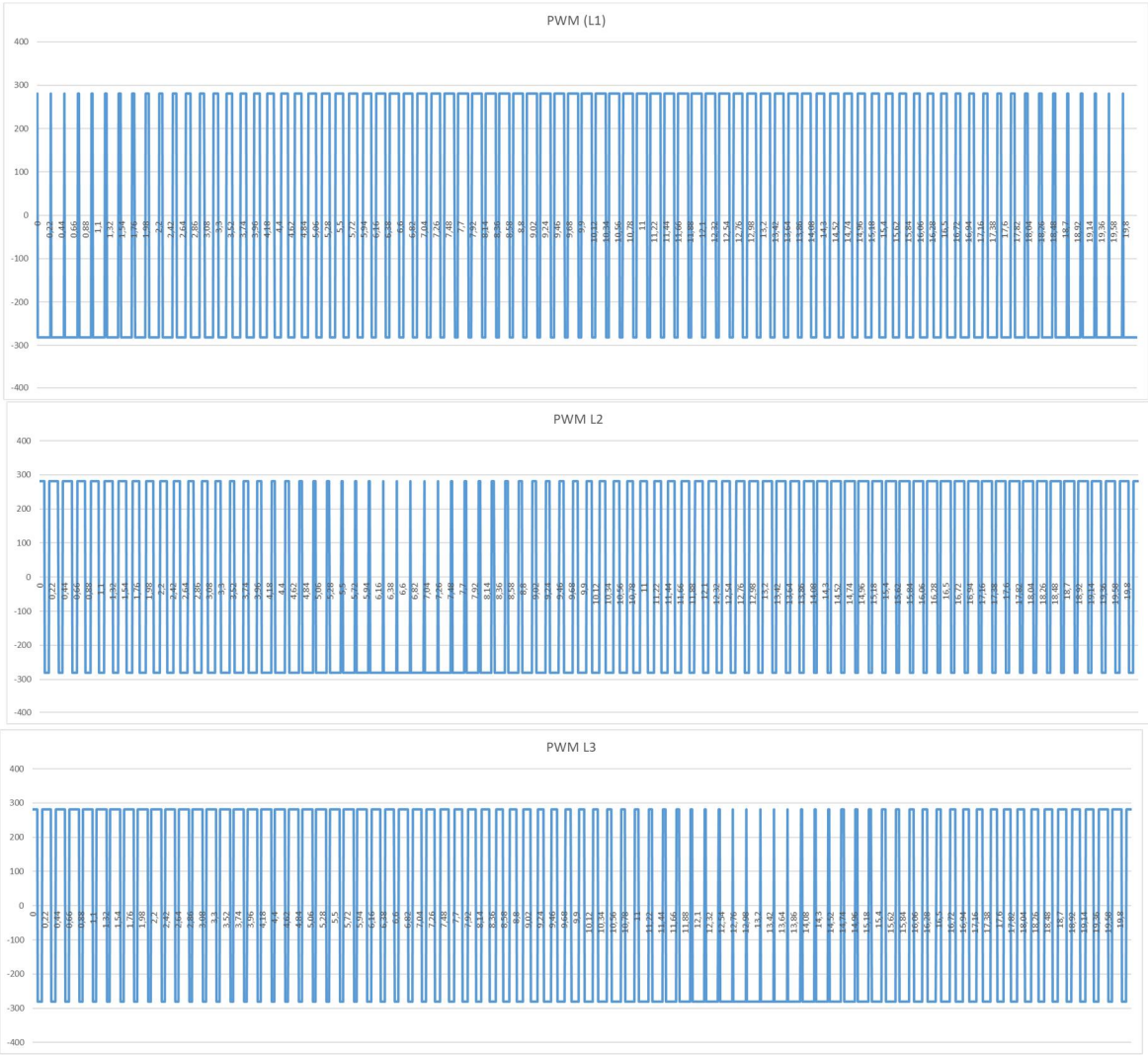




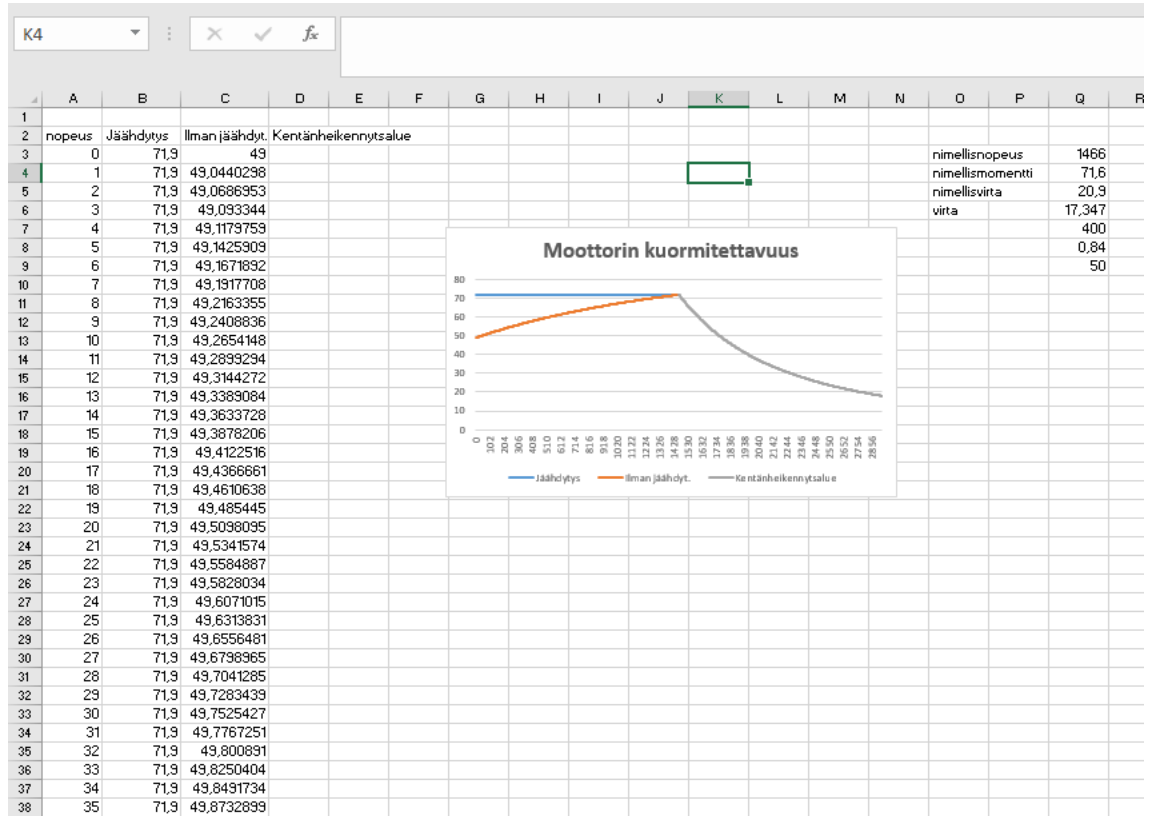




1-vaiheinen:



Liite 6. Sähkömoottori kuormitettavuus



Liite 7. Täysin ohjatut suuntaajakytkenät

Luku 16: Tehoelektroniikka

Taulukko 16.1a. Täysinohjatut suuntaajakytkenät.

Kytken n tunnus		Muuntajan kytken t		Suuntaajan kytken t	p	q	$\frac{\delta_{qs}}{g}$	$\frac{U_{dio}}{U_{v0}}$	$\frac{U_{lim}}{U_{dio}}$	$\frac{I_p}{I_d}$	$\frac{\hat{I}_p}{I_d}$	$\frac{I_{pd}}{I_d}$	$\frac{I_v}{I_d}$	$\frac{I'_L}{I_d}$	$\frac{P_{Lj}}{U_{dio} \cdot I_d}$	$W_{U1}\%$
DIN	IEC	Ensiö	Toisio													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
M2	1				2	2	2	0,450	3,142	0,707 (0,785)	1,000 (1,571)	0,500	0,707 (0,785)	0,500 (0,555)	1,11 (1,23)	48,3
M3	2				3	3	3	0,675	2,094	0,577 (0,588)	1,000 (1,21)	0,333	0,577 (0,588)	0,472 (0,478)	1,21 (1,23)	18,3
B2	9				2	2	8	0,900	1,571	0,707 (0,785)	1,000 (1,571)	0,500	1,000 (1,11)	1,000 (1,11)	1,11 (1,23)	48,3
B6	10				6	3	6	1,350	1,047	0,577 (0,588)	1,000 (1,045)	0,333	0,816 (0,820)	0,816 (0,820)	1,05 (1,06)	4,2
B6 2S15	13a				12	3	12	2,701	1,047	0,289	0,500	0,167	0,408	0,789	1,01	1,03

Liite 8. ABB Motors and Generators

Technical data

IE2 Process performance cast iron motors, 1500 r/min

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B

IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cosφ	Current				Torque T _N Nm T/T _N T _Δ /T _N	Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure Level L _{WA} dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _N A	I _Δ /I _N	T _N Nm					
1500 r/min = 4 poles				400 V 50 Hz			CENELEC-design								
0.25	M3BP 71MA 4	3GBP072321-**-B	1365	68,3	70,7	69,6	0,81	0,6	3,5	1,7	1,9	2,0	0,000740	10	45
0.37	M3BP 71MB 4	3GBP072322-**-B	1380	72,4	74,5	74,7	0,83	0,9	4,6	2,5	1,6	2,1	0,000680	11	45
0.55	M3BP 80MA 4	3GBP082321-**-B	1415	74,5	73,8	70,0	0,73	1,4	5,0	3,7	2,0	2,8	0,00144	15	45
0.75	M3BP 80MD 4	3GBP082324-**-B	1430	81,0	81,0	78,2	0,73	1,8	5,3	5,0	2,7	3,2	0,00205	17	50
1.1	M3BP 90SLB 4	3GBP092322-**-B	1435	83,6	84,1	82,4	0,80	2,4	6,5	7,3	2,4	3,4	0,00440	25	50
1.5	M3BP 90SLD 4	3GBP092325-**-B	1430	84,3	85,1	83,9	0,83	3,0	6,3	10,0	2,7	3,4	0,00530	27	56
2.2	M3BP 100LC 4	3GBP102323-**-B	1450	85,9	85,1	83,4	0,78	4,6	7,7	14,5	2,7	4,1	0,00948	36	56
3	M3BP 100LD 4	3GBP102324-**-B	1450	86,8	86,9	85,3	0,79	6,1	7,7	19,8	2,9	3,4	0,0110	38	58
4	M3BP 112MB 4	3GBP112322-**-B	1440	86,8	87,7	87,3	0,82	7,9	7,0	26,5	2,5	2,9	0,0125	44	59
5.5	M3BP 132SMB 4	3GBP132322-**-B	1460	89,0	89,8	88,9	0,80	10,8	6,7	36,0	2,2	3,2	0,0328	70	67
7.5	M3BP 132SMC 4	3GBP132323-**-B	1450	89,3	90,1	90,0	0,81	14,5	7,2	49,4	2,5	3,5	0,0366	73	64
11	M3BP 160MLA 4	3GBP162410-**-G	1466	90,4	91,6	91,3	0,84	20,9	6,8	71,6	2,2	2,8	0,0810	135	62
15	M3BP 160MLB 4	3GBP162420-**-G	1470	91,4	92,3	92,2	0,83	28,5	7,1	97,4	2,6	3,0	0,0990	165	62
18.5	M3BP 180MLA 4	3GBP182410-**-G	1477	91,9	92,8	92,6	0,84	34,5	7,2	119	2,6	2,9	0,166	205	62
22	M3BP 180MLB 4	3GBP182420-**-G	1475	92,3	93,3	93,2	0,84	40,9	7,3	142	2,6	3,0	0,195	222	62
30	M3BP 200MLA 4	3GBP202410-**-G	1480	93,2	94,0	93,7	0,84	55,3	7,4	193	2,8	3,0	0,309	291	63
37	M3BP 225SMA 4	3GBP222210-**-G	1479	93,4	93,9	93,4	0,84	68,0	7,1	238	2,6	2,9	0,356	324	66
45	M3BP 225SMB 4	3GBP222220-**-G	1480	93,9	94,3	93,9	0,85	81,3	7,5	290	2,8	3,2	0,440	356	66
55	M3BP 250SMA 4	3GBP252210-**-G	1480	94,4	94,9	94,6	0,85	98,9	7,0	354	2,6	2,9	0,765	414	67
75	M3BP 280SMA 4	3GBP282210-**-G	1484	94,5	94,7	94,4	0,85	134	6,9	482	2,5	2,8	1,25	625	68
90	M3BP 280SMB 4	3GBP282220-**-G	1483	94,7	95,0	94,5	0,85	160	7,2	579	2,5	2,7	1,50	665	68
110	M3BP 315SMA 4	3GBP312210-**-G	1487	95,1	95,1	94,3	0,86	194	7,2	706	2,3	2,8	2,30	900	70
132	M3BP 315SMB 4	3GBP312220-**-G	1487	95,4	95,4	94,7	0,86	232	7,1	847	2,3	2,7	2,60	960	70
160	M3BP 315SMC 4	3GBP312230-**-G	1487	95,3	95,3	94,8	0,85	284	7,2	1027	2,4	2,9	2,90	1000	70
200	M3BP 315MLA 4	3GBP312410-**-G	1486	95,6	95,6	95,3	0,86	351	7,2	1285	2,5	2,9	3,50	1160	70
250	M3BP 355SMA 4	3GBP352210-**-G	1488	95,9	96,0	95,5	0,85	442	7,1	1604	2,3	2,7	5,90	1610	74
315	M3BP 355SMB 4	3GBP352220-**-G	1488	95,9	96,2	95,8	0,86	550	7,3	2021	2,3	2,8	6,90	1780	74
355	M3BP 355SMC 4	3GBP352230-**-G	1487	95,9	96,2	95,9	0,87	614	6,8	2279	2,4	2,7	7,20	1820	78
400	M3BP 355MLA 4	3GBP352410-**-G	1489	96,3	96,3	95,9	0,85	705	6,8	2565	2,3	2,6	8,40	2140	78
450	M3BP 355MLB 4	3GBP352420-**-G	1490	96,7	96,7	96,1	0,86	780	6,9	2884	2,3	2,9	8,40	2140	78
500	M3BP 355LKA 4	3GBP352810-**-G	1490	97,0	97,0	96,5	0,86	865	6,8	3204	2,0	3,0	10,0	2500	78
560	¹⁾ M3BP 355LKB 4	3GBP352820-**-G	1490	96,9	96,9	96,5	0,85	981	7,2	3588	2,6	2,7	10,6	2600	78
560	¹⁾ M3BP 400LA 4	3GBP402510-**-G	1491	96,8	96,8	96,3	0,85	982	7,4	3586	2,4	2,8	15,0	3200	78
630	M3BP 400LB 4	3GBP402520-**-G	1491	97,0	97,0	96,5	0,87	1077	7,6	4034	2,2	2,9	16,0	3300	78
710	¹⁾ M3BP 400LC 4	3GBP402530-**-G	1491	97,1	97,1	96,7	0,86	1227	7,6	4547	2,4	3,0	17,0	3400	78
800	M3BP 450LA 4	3GBP452510-**-G	1491	96,9	96,9	96,4	0,86	1396	7,0	5121	1,3	2,8	23,0	4050	85
900	M3BP 450LB 4	3GBP452520-**-G	1492	97,1	97,0	96,5	0,86	1573	7,0	5761	1,3	2,8	25,0	4350	85
1000	¹⁾ M3BP 450LC 4	3GBP452530-**-G	1491	97,2	97,2	96,7	0,86	1724	6,8	6404	1,3	2,7	30,0	4700	85

¹⁾ Temperature rise class F